

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ESCENARIO DE CONTROL EN  
MATLAB PARA LA PLANTA AMATROL T5553 DEL LABORATORIO DE  
CONTROL DE PROCESOS DE LA CORPORACIÓN UNIVERSITARIA  
AUTÓNOMA DEL CAUCA**



**JUAN JOSE MUÑOZ MARTINEZ  
LINA MARCELA LARA LOZADA**

**CORPORACION UNIVERSITARIA AUTONOMA DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERIAS  
PROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRONICA  
NOVIEMBRE DEL 2018**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ESCENARIO DE CONTROL EN  
MATLAB PARA LA PLANTA AMATROL T5553 DEL LABORATORIO DE  
CONTROL DE PROCESOS DE LA CORPORACIÓN UNIVERSITARIA  
AUTÓNOMA DEL CAUCA**



**JUAN JOSE MUÑOZ MARTINEZ  
LINA MARCELA LARA LOZADA**

**Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Electrónico**

**Director:  
MG. FRANCISCO FRANCO OBANDO DIAZ**

**CORPORACION UNIVERSITARIA AUTONOMA DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERIAS  
PROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRONICA  
NOVIEMBRE DE 2018**

## DEDICATORIAS

*Este logro y todos los que alcance en la vida los dedico a mi abuelo Juan Bautista por todas sus enseñanzas ya que con su ejemplo de vida, ha dejado en mí un modelo de justicia, lealtad, trabajo y amor.*

*Juan José Muñoz Martínez*

*A Dios por guiarme, bendecirme grandemente y por darme la fuerzas para no rendirme frente a todos los obstáculos que se presentaron en mi carrera.*

*A mi bebe, mi pequeña, mi motivo para salir adelante, mi mayor fortaleza, quien vino a llenar mi vida de felicidad.*

*A mis padres por su apoyo y sacrificio, gracias por convertirme en lo que soy, siempre estaré orgullosa de tenerlos como padres, se merecen lo mejor.*

*A mi tío por sus consejos, su apoyo y porque a pesar de que el destino nos distancio por mucho tiempo, nos dio la oportunidad de reencontrarnos tener la bendición de compartir muchos años*

*A mi hermana por creer en mí, por ser mi apoyo incondicional, por estar siempre a mi lado siendo la guía y el camino para poder llegar a este punto de mi carrera.*

*A mis docentes, por guiarme, formarme y prepararme para el mañana, por su tiempo y dedicación, gracias por creer en nosotros.*

*Lina Marcela Lara Lozada*

## AGRADECIMIENTOS

*A mi papa y mama, por todo el apoyo incondicional que recibo desde que era niño, por sus buenos ejemplos de vida y por ayudarme a ser la persona que siempre quise ser*

*A mi abuela por formar parte de mi educación y por su gran amor*

*A mi familia por ser la fuerza que me motiva a querer tener un buen futuro.*

*Al director de la tesis Mg. Francisco Franco por su dedicación, guía y transmisión de conocimiento a nuestro trabajo investigativo, al Mg. Juan Pablo Diago, al Mg. Jeison Tacue y al Mg. Yamir Bolaños por brindarnos asesoría cuando lo necesitábamos.*

*A la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca*

*Juan José Muñoz Martínez*

*A Dios, por darme la sabiduría y el entendimiento, haciendo posible un logro más en mi vida.*

*A mis Padres, por todo el sacrificio y esfuerzo, que me llenaron de convicción para alcanzar mis sueños. Gracias por toda la esperanza y el amor brindado. Todo esto es por ustedes y para ustedes.*

*A mi Director de trabajo de grado, por compartirnos generosamente sus conocimientos, por brindarnos su ayuda, afecto, paciencia y amistad, fundamentales para la culminación de éste trabajo.*

*A mi compañero de trabajo de grado y amigo, por su apoyo, por su ayuda, por ser un pilar fundamental para alcanzar este logro.*

*A la Corporación Universitaria Autónoma Del Cauca por abrirme las puertas de tan prestigiosa institución, por brindarme una excelente formación profesional, gracias por guiarme en este camino y haber logrado hoy uno de mis más grandes anhelos.*

*Lina Marcela Lara Lozada*

## RESUMEN

El presente trabajo investigativo es acerca de la implementación de un controlador digital PID (Proporcional Integral Derivativo) diseñado en el software de MATLAB para la planta de temperatura Amatrol T5553, que simula un proceso de transferencia de energía por medio de intercambiadores de calor, siendo estos instrumentos unos de los más importantes. Así, para establecer la comunicación entre en el software y el proceso, se diseñó un sistema de adquisición de datos que envía la información del sensor al computador, y este cuenta con dos interfaces realizadas en la herramienta GUIDE de MATLAB para encontrar la curva de reacción y para ejercer control, este último también se puede realizar con una estructura de bloques en SIMULINK. Finalmente, se muestran pruebas reales y simuladas.

**Palabras clave:** Sistema de control, Planta de temperatura Amatrol, MATLAB, PID.

## ABSTRACT

The present investigative work is about the implementation of a PID digital controller (Integral Derivative Proportional) designed in the MATLAB software for the Amatrol T5553 temperature plant, which simulates a process of energy transfer by means of heat exchangers, being these some of the most important instruments. Thus, to establish communication between the software and the process, a data acquisition system was designed that sends the information from the sensor to the computer, and this has two interfaces made in the GUIDE tool of MATLAB to find the reaction curve and to exercise control, the latter can also be performed with a block structure in SIMULINK. Finally, real and simulated tests are shown.

**Key Words:** Control system, Amatrol temperature plant, MATLAB, PID.

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Esquema intercambiador de calor. Fuente: Autores	4
Figura 2 Intercambiador de calor de cabezal fijo. Fuente: [4]	5
Figura 3 Intercambiador de calor en forma de U. Fuente: [4]	5
Figura 4 Intercambiador de calor de placas paralelas. Fuente: [7]	6
Figura 5 Esquema de un sistema de control en lazo cerrado. Fuente: Autores	7
Figura 6 Esquema de un sistema lazo abierto. Fuente: Autores	7
Figura 7 Estructura de control de tipo RST. Fuente: [10]	8
Figura 8 Esquema de control por mínima varianza. Fuente: [10]	9
Figura 9 Esquema de control predictivo. Fuente: [12]	10
Figura 10 Estructura de control PID. Fuente: [14]	11
Figura 11 Prueba de lazo abierto para encontrar la curva de reacción de un proceso. Fuente: Autores.	13
Figura 12 Método de la tangente de Ziegler y Nicholds. Fuente: [15]	13
Figura 13 Método de dos puntos. Fuente: [15]	14
Figura 14 Estructura de la planta T5553 del laboratorio de procesos. Fuente: [20]	17
Figura 15 Diagrama P&ID según norma ANSI/ISA-S5.1 de la planta de temperatura Amatrol T5553. Fuente: [20]	21
Figura 16 Estructura de control para la planta de temperatura Amatrol T5553. Fuente: Autores	23
Figura 17 Parte frontal del sistema de adquisición de datos diseñado en el software de Sketchup. Fuente: Autores	24
Figura 18 Conexiones internas del sistema de adquisición de la planta de temperatura Amatrol T5553. Fuente: Autores	24
Figura 19 Toma parte frontal del sistema de adquisición de la planta de temperatura Amatrol T5553. Fuente: Autores	25
Figura 20 Toma trasera del sistema de adquisición de la planta de temperatura Amatrol T5553. Fuente: Autores.	26

Figura 21: Instalación del sistema de adquisición de datos en la planta. Fuente: Autores	26
Figura 22 Tarjeta para convertir voltaje (1-5v) a corriente (4-20mA). Fuente: Autores	27
Figura 23 Interfaz de usuario para obtener la curva de reacción de la planta de temperatura amatrol T5553. Fuente: Autores.	28
Figura 24 Diagrama de flujo de la interfaz curva de reacción. Fuente: Autores	29
Figura 25 Interfaz de control. Fuente: Autores.	31
Figura 26 Diagrama de flujo de la interfaz de control. Fuente: Autores	32
Figura 27 Estructura de control planteada para implementar en Simulink. Fuente: Autores	33
Figura 28 Estructura de control en Simulink de MATLAB. Fuente: Autores.	34
Figura 29 Proceso planta intercambiador 1. Fuente: Autores.	37
Figura 30 Proceso planta intercambiador 2. Fuente: Autores	41
Figura 31 Tanque de Proceso. Fuente: Autores	42
Figura 32 Sensores de temperatura en la planta. Fuente: Autores.	44
Figura 33 Curva de reacción de la planta de temperatura con un cambio en la variable manipulada de 35%. Fuente: Autores	46
Figura 34 Resultado de la prueba de lazo abierto para cada autor y curva real del proceso. Fuente: Autores.	49
Figura 35 Esquema de control diseñado en Simulink. Fuente: Autores..	51
Figura 36 Composición interna del bloque Escal. Fuente: Autores.	52
Figura 37 Prueba de control PID para los métodos de sintonización de Ziegler-Nicholds, Cohen-Coon y Autotuning de MATLAB. Fuente: Autores.	54
Figura 38 Esfuerzo de control para el métodos teórico de Autotuning. Fuente: Autores..	55
Figura 39 Esfuerzo de control para el métodos teórico de Cohen-Coon. Fuente: Autores.	55
Figura 40 Esfuerzo de control para el métodos teórico de Ziegler-Nicholds. Fuente: Autores.	56



Figura 41 Prueba de controlabilidad en la interfaz con parámetros de sintonización basados en el método teórico de autotuning. Fuente: Autores. 60

Figura 42 Prueba de controlabilidad en Simulink con parámetros de sintonización basados en el método de autotuning. Fuente: Autores. 61

Figura 43 Prueba de control, con el termostato configurado a más de 60 °C. Fuente: Autores 63

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Constantes para la identificación de los modelos de primer orden más tiempo muerto. Fuente: [15]	15
Tabla 2 Parámetros de sintonización de Ziegler-Nichols. Fuente: [17]	15
Tabla 3 Parámetros de sintonización de Cohen-Coon. Fuente: [18]	16
Tabla 4 Componentes de la planta de temperatura Amatrol T5553. Fuente: [20]	20
Tabla 5 Instrumentación planta de temperatura Amatrol T5553. Fuente: [20]	22
Tabla 6 Modelos de primer orden más tiempo muerto. Fuente: Autores	48
Tabla 7 Fórmulas de sintonización por el método de Ziegler y Nicholds en lazo abierto. Fuente: [17]	50
Tabla 8 Parámetros de sintonización por el método de Ziegler y Nicholds en lazo abierto. Fuente: Autores.	50
Tabla 9 Fórmulas de sintonización por el método de Cohen y Coon en lazo abierto. Fuente: [18]	50
Tabla 10 Parámetros de sintonización por el método de Cohen y Coon en lazo abierto. Fuente: Autores.	51
Tabla 11 Respuesta del controlador a un cambio de consigna de 45 a 43°C en diferentes configuraciones. Fuente: Autores.	53
Tabla 12 parámetros de sintonización encontrados por medio del autotuning de Simulink en unidades de tiempo. Fuente: Autores	53
Tabla 13 Parámetros de sintonización en ganancias por el método de Ziegler y Nicholds. Fuente: Autores	57
Tabla 14 Parámetros de sintonización en ganancias por el método de Cohen y Coon. Fuente: Autores	57
Tabla 15 Parámetros de sintonización en ganancias por el método de Autotuning. Fuente: Autores	57
Tabla 16 Resultados de pruebas reales a la planta de temperatura Amatrol T5553 mediante el esquema de Simulink. Fuente: Autores	59
Tabla 17 Ajuste de parámetros de sintonización para la interfaz de control. Fuente: Autores	60
Tabla 18 Ajuste de parámetros de sintonización para Simulink. Fuente: Autores	61

## CONTENIDO

Dedicatorias	iii
Agradecimientos	iv
Resumen	v
Abstract	vi
Índice de figuras	vi, vii, ix
Índice de tablas	x
Contenido	xi, xii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Planteamiento del problema	2
1.2. Justificación	2
1.3. Objetivos	3
1.3.1. Objetivo General	3
1.3.2. Objetivos específicos	3
2. INTERCAMBIADORES DE CALOR Y SISTEMAS DE CONTROL	4
2.1. Intercambiadores de calor	4
2.1.1. Tipos de intercambiadores de calor	4
2.2. Sistemas de control	6
2.2.1. Lazo cerrado de control	6
2.2.2. Lazo abierto de control	7
2.2.3. Algoritmos de control convencionales	7
2.3. Modelado dinámico de un sistema con intercambiador de calor	11
2.3.1. Métodos experimentales a partir de la curva de reacción	12
2.4. Sintonización de un controlador	15
3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL	17
3.1. Generalidades de la planta de temperatura Amatrol T5553	17
3.2. Implementación	23
3.2.1. Sistema de adquisición de datos	24
3.2.2. PC (Controlador)	27

3.3.	Modelo dinámico de la planta a partir del balance de masa y energía	36
3.3.1.	Análisis del proceso del intercambiador 1	37
3.3.2.	Análisis del proceso del intercambiador 2	41
3.3.3.	Análisis en el tanque del proceso	41
3.3.4.	Consideración.	43
4.	RESULTADOS	44
4.1.	Elección del sensor de temperatura	44
4.2.	Identificación del modelo	45
4.3.	Sintonización del controlador	49
4.3.1.	Ziegler y Nicholds	49
4.3.2.	Cohen y Coon	50
4.3.3.	Autotuning de Simulink.	51
4.4.	Pruebas de controlabilidad	54
4.4.1.	Prueba real de controlabilidad mediante la interfaz de usuario	56
4.4.2.	Prueba real de controlabilidad mediante Simulink	56
5.	RECOMENDACIONES	63
6.	CONCLUSIONES	64
7.	BIBLIOGRAFÍA	65

## 1. INTRODUCCIÓN

En un recuento histórico, los sistemas de control datan del siglo III A.C, siendo el primer dispositivo realimentado el reloj acuático de "Ktesibios" en Alejandría-Egipto, que controlaba el tiempo regulando el flujo de agua en un recipiente. [1]. Años más tarde y a partir del descubrimiento del campo electromagnético que hizo Maxwell, algunos autores de la época, empezaron a relacionar sistemas de la vida con representaciones mediante modelos matemáticos como ecuaciones diferenciales, las cuales daban un indicio del funcionamiento de diferentes procesos industriales, este procedimiento fue la base de lo que hoy se conoce como automatización, la cual en la actualidad es muy utilizada porque disminuye los tiempos de producción, da una mejor utilización de los espacios, reorganiza las fuerzas de trabajo y da modernidad a las instalaciones. [2]

En consecuencia, este trabajo, busca que los estudiantes de los programas de Ingeniería electrónica, automática o carreras afines, afiancen sus conocimientos de control y sepan adaptarse a las necesidades de las industrias.

### **1.1. Planteamiento del problema**

En las últimas décadas, se ha incrementado el número de procesos de producción automatizados en la industria, con el único objetivo de hacerlos más eficientes (mayor número de unidades de productos o servicio generados en un tiempo determinado con un menor costo). Generándose un amplio y basto campo de trabajo para ingenieros, quienes con sus habilidades y capacidades buscan problemas, plantean soluciones y estrategias para cumplir con la premisa mencionada.

En ese contexto, se hace necesario que los estudiantes de Ingeniería Electrónica de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca, cuenten con espacios que propicien un acercamiento a los entornos industriales, y aunque se cuente en el laboratorio de procesos con plantas de nivel, temperatura y presión, estas no tienen interfaces HMI (*Human Machine Interface*) para visualizar el comportamiento de las variables relevantes, generando carencia en el aprendizaje de los alumnos, sin embargo, en los cursos de sistemas dinámicos y control de procesos, el estudiante aprende a modelar mediante ecuaciones diferenciales distintos sistemas y a utilizar MATLAB como un software de control, lo que hace posible diseñar interfaces de usuario que permitan obtener una visualización gráfica del proceso.

Teniendo en cuenta lo anterior se pretende dar respuesta a la siguiente pregunta:

¿Cómo mejorar el proceso pedagógico de aprendizaje, sobre la implementación de estrategias reales de control en la planta de temperatura Amatrol T5553, para los estudiantes del programa de Ingeniería Electrónica de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca?

### **1.2. Justificación**

Los escenarios de control son sistemas que están compuestos por una planta, un controlador, el medio de comunicación y por una interfaz HMI. La planta de temperatura AMATROL T5553 que se encuentra en el laboratorio de procesos, cuenta con una interfaz HMI que permite la manipulación del *set point* y otras funciones, sin embargo, no se puede visualizar el comportamiento de la variable controlada y manipulada, lo que genera una carencia en el aprendizaje, en consecuencia, se pretende complementar un escenario de control con el software de MATLAB para visualizar el comportamiento del proceso cuando se tome la curva de reacción o se realice control, paralelamente, se entregan guías de usuario para manipular las interfaces y lograr de esta manera que, los estudiantes venideros cuenten con más herramientas que mejoren el proceso pedagógico.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo General**

Desarrollar un sistema de control para la planta de temperatura T5553 del laboratorio de procesos mediante la herramienta Simulink de Matlab.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Realizar el acoplamiento de las señales para el control del proceso desde la planta T5553 hacia Simulink.
- Implementar en Simulink un controlador de temperatura, partiendo del modelo dinámico del proceso, y verificar que la variable controlada realice el seguimiento a un *set point* deseado, controlando los errores.
- Generar las guías que permitan incluir el sistema desarrollado en el curso de control de procesos.

## 2. INTERCAMBIADORES DE CALOR Y SISTEMAS DE CONTROL

### 2.1. Intercambiadores de calor

El intercambiador de calor es un equipo que cuenta con dos vías para la circulación de diferentes clases de fluido como: agua, vapor, petróleo, aceites, gas, entre otros, que tiene como función disminuir o incrementar la temperatura de una sustancia en un proceso, a su vez, su uso es bastante común en las industrias alimentaria, marítima, química, cosmética, biotecnológica, automovilística, metalúrgica, papelera, minera, textil, e incluso en energías renovables.[3] En la Figura 1 se puede observar el esquema de un intercambiador de forma general.



Figura 1 Esquema intercambiador de calor. Fuente: Autores

#### 2.1.1. Tipos de intercambiadores de calor

Existen diferentes tipos de intercambiadores de calor, su uso depende del fluido que circula por él, se debe tener en cuenta características como la presión, la temperatura, el tipo y la cantidad.

Acto seguido, se describe los intercambiadores de calor más utilizados en la industria. [4]

##### 2.1.1.1. Carcaza y tubo

Los intercambiadores de calor de este tipo constan de un grupo de tubos ubicados dentro de una carcasa de forma cilíndrica, los cuales tienen la función de transportar el fluido 1, mientras que en la carcasa circula el fluido 2, se debe agregar que gracias a su construcción perpendicular soportan presiones altas. [4]

Los intercambiadores de carcaza y tubo son de fácil mantenimiento y pueden construirse en diferentes tamaños, además se clasifican en dos clases, de cabezal fijo o en forma de "U".[5]



### 2.1.1.1.1. De cabezal fijo

Estos equipos se caracterizan por tener apenas dos placas de tubos soldados a la carcasa, lo cual hace que la velocidad del fluido que circula dentro de los tubos sea limitada, disminuyendo así el coeficiente de transmisión de calor, no obstante, se pueden utilizar para altas presiones o fluidos tóxicos. [6] Los tubos pueden limpiarse por dentro de manera mecánica después de quitar la tapa del canal, mientras que la carcasa no se puede extraer; razón por la cual su limpieza debe realizarse químicamente. [4]

A continuación, se muestra en Figura 2 el intercambiador de cabezal fijo tipo BEM.

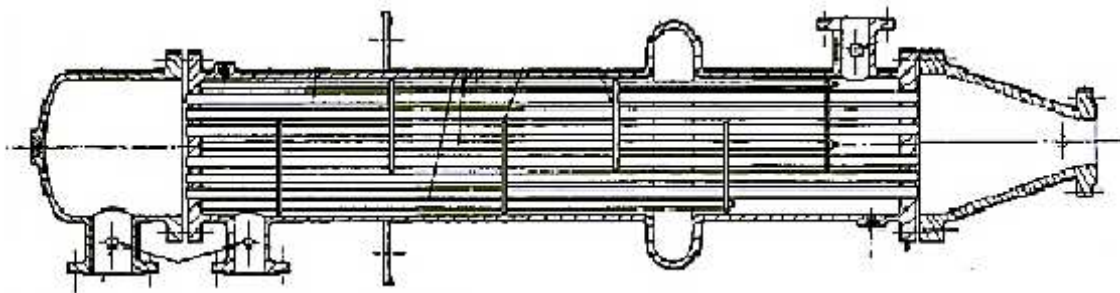


Figura 2 Intercambiador de calor de cabezal fijo. Fuente: [4]

### 2.1.1.1.2. En forma de U

Estos equipos se caracterizan por tener solo una placa, donde se introducen los tubos en forma de "U", estos al estar sueltos de la carcasa, eliminan el problema de expansión diferencial, permitiendo su utilización en altas presiones, sin embargo, no es fácil retirarlos para reemplazarlos o limpiarlos. [5] En la Figura 3 se muestra el intercambiador en referencia.

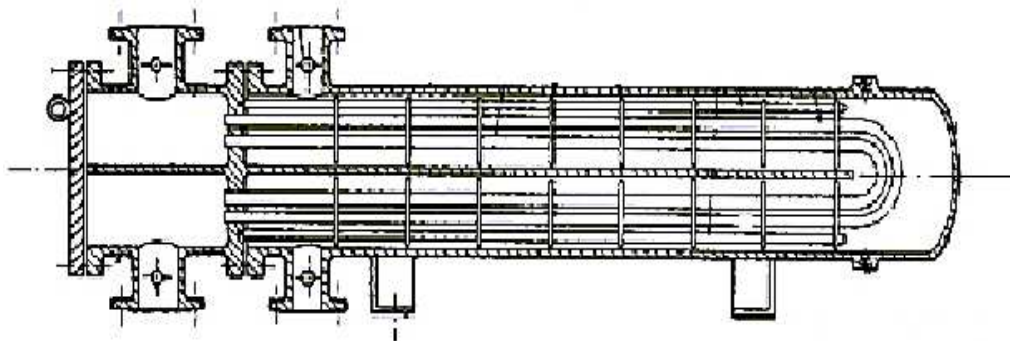


Figura 3 Intercambiador de calor en forma de U. Fuente: [4]

### 2.1.1.2. Plato o placas

Este intercambiador contiene placas con el fin de separar los fluidos; su transferencia de energía es mayor a uno de carcasa y tubo que sea de igual

tamaño, además, por su construcción deben trabajar a presiones pequeñas porque en las juntas de las placas no se puede realizar un sellado totalmente confiable. [4] En la Figura 4 se presenta el intercambiador en referencia.



*Figura 4 Intercambiador de calor de placas paralelas. Fuente: [7]*

## **2.2. Sistemas de control**

Un sistema de control es un conjunto de componentes mecánicos, hidráulicos, y/o electrónicos que llevan un proceso a un estado deseado de funcionamiento. Así, se excita la variable manipulada (cantidad o condición del proceso que es variada) con el fin de obtener cambios en la variable controlada (cantidad o condición del proceso que es medida). [8]

Existen dos tipos de sistemas de control, manual o automáticos. En los primeros el hombre interviene sobre el proceso productivo, en los segundos las acciones se ejecutan sin necesidad de la intervención constante de los humanos, [8] además, en estos últimos existen estructuras que se denominan de lazo abierto o cerrado, a continuación se explica cada una de ellas.[8]

### **2.2.1. Lazo cerrado de control**

Son los sistemas que utilizan sensores para retroalimentar la medición de la variable controlada o de proceso al controlador, este se encarga de compararla con un valor deseado y emitir una señal al actuador de la planta para llevar el proceso a un punto de operación. [9]

En seguida, se muestra la configuración de lazo cerrado en la Figura 5.

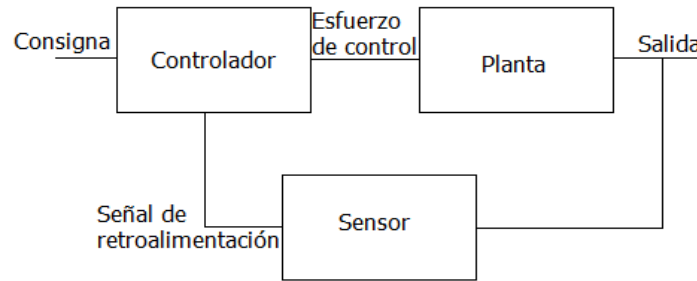


Figura 5 Esquema de un sistema de control en lazo cerrado. Fuente: Autores

### 2.2.2. Lazo abierto de control

Son sistemas que en los cuales la salida no presenta influencia o efecto en la acción de control. Solo existen condiciones iniciales para el funcionamiento, por ejemplo: un semáforo.

A continuación, se muestra en la Figura 6 el esquema de un sistema de control en lazo abierto. [9]

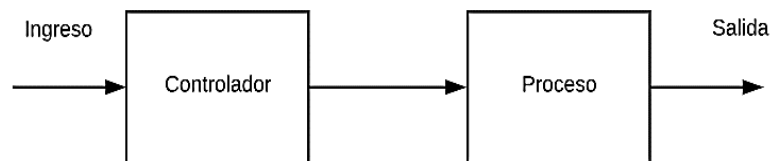


Figura 6 Esquema de un sistema lazo abierto. Fuente: Autores

### 2.2.3. Algoritmos de control convencionales

Actualmente, se consideran diversas maneras de clasificar los controles, estas dependen del algoritmo utilizado, los más usuales son los controles predictivos, los RST, de mínima varianza y los PID, [10] a continuación, se intenta describir cada uno de ellos.

#### 2.2.3.1. Controlador RST

El controlador RST (*Reference Signal Tracking*) es aplicable solamente para sistemas SISO (una entrada y salida), se compone de tres polinomios que se denominan R, S y T mediante el método de colocación de polos. [11] Para implementar este controlador se debe conocer el modelo matemático que representa la dinámica de la planta (función de transferencia), para ello se tiene en cuenta la Ecuación 1, modelo ARMAX.[10]

$$A(z^{-1})y(t) = z^{-d}B(z^{-1})u(t)$$

Ecuación 1

Donde:

$A(z^{-1})$ : Son los polos de malla abierta

$y(t)$ : Salida del sistema

$z^{-d}$ : Retardo en tiempo discreto

$B(z^{-1})$ : Son los ceros de malla abierta

$u(t)$ : Acción de control

Por otro lado, la ley de control se representa con la Ecuación 2, en la cual los polinomios R, S y T, son los que se tratan de encontrar con un desarrollo matemático.[10]

$$R(z^{-1})u(t) = T(z^{-1})w(t) - S(z^{-1})y(t)$$

*Ecuación 2*

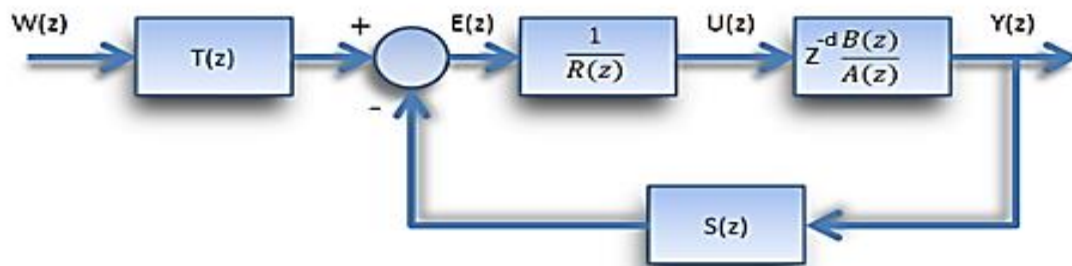
Donde:

$R$ : Polinomio de la señal de control

$S$ : Polinomio de la salida del proceso

$T$ : Polinomio de la trayectoria deseada

Finalmente, se muestra en la Figura 7 la estructura en lazo cerrado de un controlador RST.



*Figura 7 Estructura de control de tipo RST. Fuente: [10]*

### 2.2.3.2. Controlador por mínima varianza

La estrategia de este controlador consiste en aplicar la señal de control en el instante  $k$  o sea  $u(k)$  tomando los valores pasados de la entrada  $(u(k-1), u(k-2), \dots, u(k-n_b))$  y de la salida  $(y(k-1), y(k-2), \dots, y(k-n_b))$ , para minimizar un índice  $J$ . [10]

La Ecuación 3 es la característica de este controlador.[10]

$$J = E(y^2(k + d + 1/k))$$

*Ecuación 3*

Donde:

$E$  : Esperanza matemática

$k$  : Instante actual

$d$  : Retardo

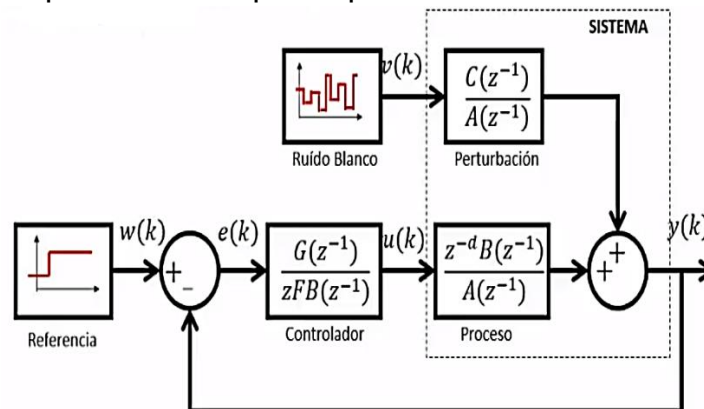
$y$  : Salida del sistema

$J$  : Índice

Para el desarrollo de un controlador de mínima varianza se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- El proceso debe ser estable
- El retardo y el orden del sistema debe de ser conocido

En la Figura 8 se presenta el esquema para un controlador de mínima varianza.



*Figura 8 Esquema de control por mínima varianza. Fuente: [10]*

### 2.2.3.3. Control predictivo

Este algoritmo utiliza el modelo dinámico de la planta para predecir la salida futura de la variable del proceso, esta acción es conocida como horizonte temporal. Gracias a que el modelo matemático tiene en cuenta todas las características dinámicas de la planta, el esfuerzo de control involucrara las restricciones físicas del proceso lo que ocasiona seguridad en la producción. Es importante mencionar, que esta acción no es realizable en la mayoría de los esquemas de control,[12] además, su uso es bastante común en sistemas MIMO (múltiples entradas y salidas).[10]

A continuación, se muestra en la Figura 9 el esquema del controlador en referencia.

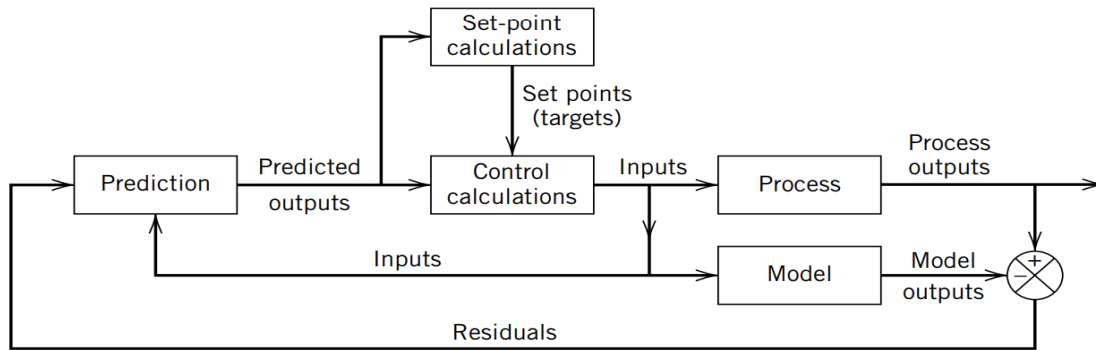


Figura 9 Esquema de control predictivo. Fuente: [12]

#### 2.2.3.4. Controlador PID

El controlador PID (Proporcional Integral Derivativo), es uno de los más utilizados en la industria, gracias a su fácil adaptación, sus buenas prestaciones y porque permite controlar sistemas de hasta segundo orden, [13] consta de tres parámetros (tiempo integral, derivativo y la constante proporcional) que se encuentran a partir del modelo dinámico de la planta, utilizando fórmulas estipuladas por diferentes autores, entre los más sobresalientes se encuentran Ziegler-Nicholds y Cohen-Coon. [8]

La ecuación característica de los algoritmos PID es la siguiente [13]

$$u(t) = k_p e(t) + \frac{k_p}{t_i} \int_0^t e(t) dt + k_p t_d \frac{d}{dt} e(t)$$

Ecuación 4

Donde:

$K_p$  : Constante proporcional

$T_i$  : Tiempo integral

$T_d$  : Tiempo derivativo

$e(t)$  : Error

$u(t)$  : Acción de control

En ese contexto, se describe la función que realiza cada parámetro del controlador.

Proporcional ( $K_p$ ): multiplica al error presente ocasionando que el esfuerzo de control oscile entre el valor máximo y mínimo, en consecuencia, la variable del proceso no va a seguir al *Set Point* de forma precisa, sin embargo, en la industria existen controladores solamente proporcionales.[13]

Tiempo integrativo ( $T_i$ ): multiplica la acumulación de los errores pasados, si se suma con la acción proporcional hace que el sistema tenga un tiempo de estabilización más rápido y que el esfuerzo de control sea más adecuado.[13]

Tiempo derivativo ( $T_d$ ): multiplica al error derivado, en consecuencia permite realizar una predicción del próximo valor de error, lo que va a enviar al controlador información adelantada del proceso, si se suma con la acción integral y proporcional, el controlador reaccionara de una mejor forma y las oscilaciones en el seguimiento a la consigna se minimizaran considerablemente.[13]

Finalmente se presenta en la Figura 10, la estructura de lazo cerrado del control PID.

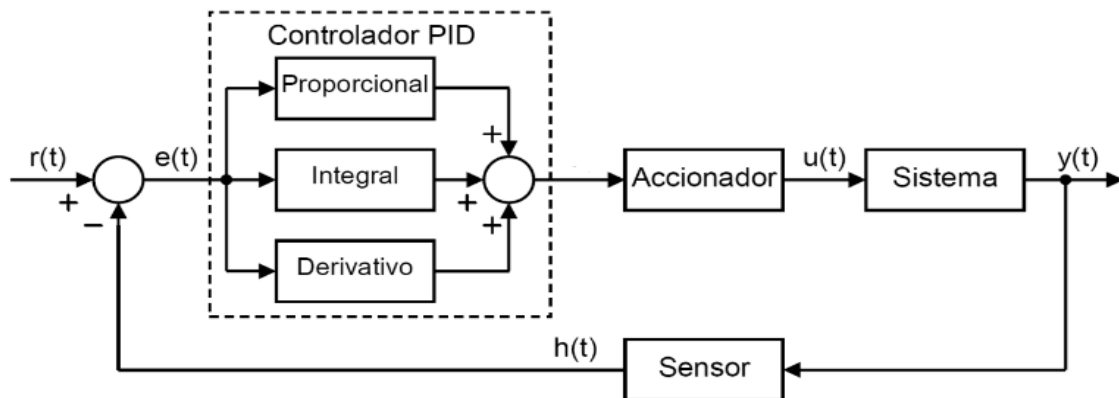


Figura 10 Estructura de control PID. Fuente: [14]

Donde:

$r(t)$ : Señal de referencia o *Setpoint*

$e(t)$ : Señal de error

$u(t)$ : Señal de control

$y(t)$ : Variable del proceso

$h(t)$ : Señal del sensor

### 2.3. Modelado dinámico de un sistema con intercambiador de calor

El modelamiento del proceso, es de gran importancia para diseñar un sistema de control, porque, a partir de la función de transferencia se puede obtener los parámetros de sintonización del controlador. Existen diversas formas para hallar el modelo dinámico de una planta, entre las más utilizadas se encuentra el balance de masa-energía o la obtención de la curva de reacción. Debido a que en este trabajo investigativo el modelo matemático se obtiene por medio de la

curva de reacción, se intenta describir a continuación los métodos experimentales de más uso en la industria. [15]

### 2.3.1. Métodos experimentales a partir de la curva de reacción

Dependiendo el comportamiento de la curva de reacción, los modelos pueden ser:

- Primer orden más tiempo muerto, como se muestra en la Ecuación 5. [15]

$$G_p(s) = \frac{K_p e^{-tmS}}{\tau S + 1}$$

*Ecuación 5*

- Segundo orden sobreamortiguado más tiempo muerto, como se muestra en la Ecuación 6. [15]

$$G_p(s) = \frac{K_p e^{-tmS}}{(\tau_1 S + 1)(\tau_2 S + 1)}$$

*Ecuación 6*

Para la Ecuación 5 y la Ecuación 6

$K_p$  : Ganancia del sistema

$\tau_1, \tau_2$  : Constante de tiempo

$tm$  : Tiempo muerto

$G_p(s)$  : Función de transferencia

En todos los métodos, la ganancia es el cambio total en la salida del sistema dividido por el cambio de la variable manipulada, como se muestra en la Ecuación 7. [15]

$$K_p = \frac{\Delta y}{\Delta u}$$

*Ecuación 7*

Donde:

$\Delta y$  : Cambio total en la variable del proceso.

$\Delta u$  : Cambio total en la variable manipulada.



Dicho lo anterior, la curva de reacción del proceso se obtiene mediante una prueba de lazo abierto, en otras palabras, se excita la variable manipulada con una señal tipo escalón para que la variable del proceso reaccione y se puedan capturar estos datos.[15]

En la Figura 11, se muestra el modelo de una prueba de lazo abierto.

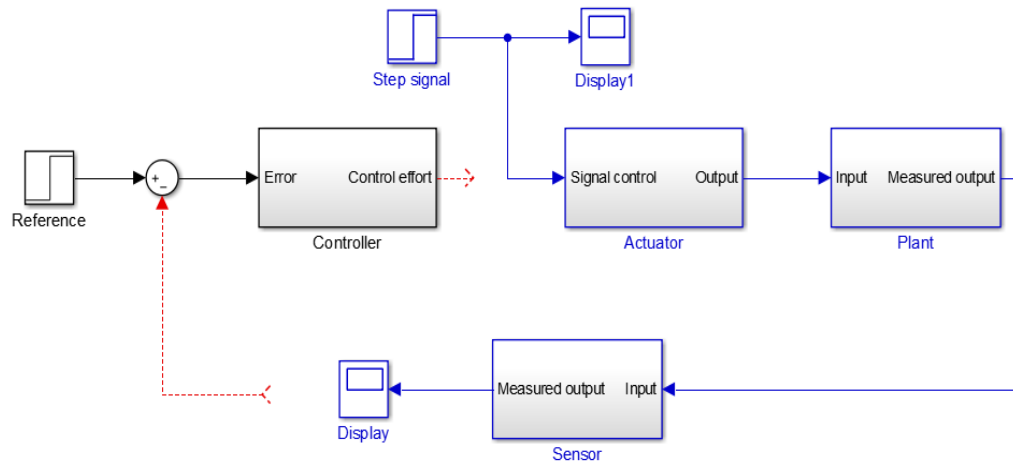


Figura 11 Prueba de lazo abierto para encontrar la curva de reacción de un proceso. Fuente: Autores.

A continuación, se presentan los métodos que se pueden utilizar para identificar el modelo dinámico de una planta a partir de la curva de reacción.

### 2.3.1.1. Método de la tangente de Ziegler y Nichols

Fue el primer método de identificación propuesto para la sintonización de un controlador, consiste en trazar una recta tangente a la curva de reacción en su punto de máxima inflexión, como se muestra en la Figura 12,[15] sin embargo, no es aplicable para sistemas inestables porque se imposibilita trazar una recta tangente. [16]

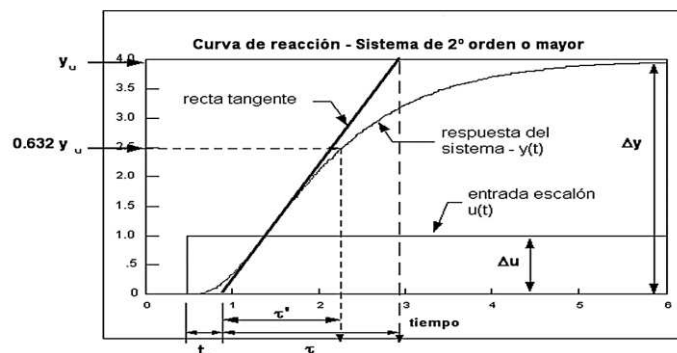


Figura 12 Método de la tangente de Ziegler y Nichols. Fuente: [15]

### 2.3.1.2. Método de dos puntos

Se trata de colocar dos puntos porcentuales en la curva de reacción del proceso, con el fin de lograr determinar los tiempos de su ubicación. En la Figura 13 se explica gráficamente lo anteriormente dicho.

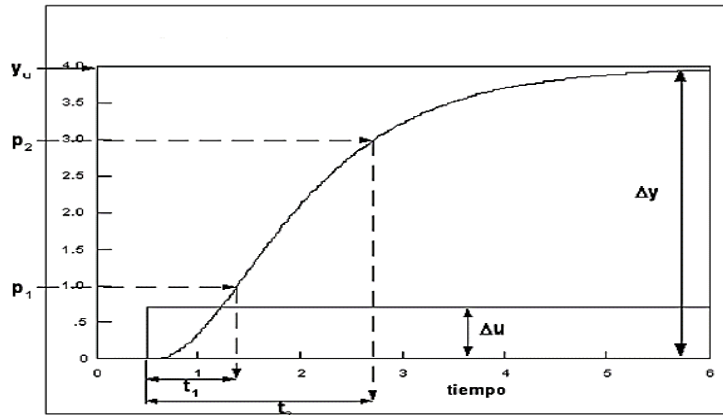


Figura 13 Método de dos puntos. Fuente: [15]

A su vez, existen dos submétodos que se describen a continuación.

#### 2.3.1.2.1. Método de Smith

El primer método basado en dos puntos sobre la curva de reacción fue propuesto por Smith. Los porcentajes de ubicación seleccionados por este autor fueron el 28.3% y el 63.2%, además el  $t_m$  (tiempo muerto) y el  $\tau$  (constante de tiempo) se obtienen con la Ecuación 8 y la Ecuación 9: [15]

$$\tau = 1.5(t_{63} - t_{28})$$

*Ecuación 8*

$$t_m = t_{63} - \tau$$

*Ecuación 9*

La ganancia se obtiene con la Ecuación 7

#### 2.3.1.2.2. Método de dos puntos generales

En este método existen autores como: Alfaro, Broida, Chen-Yan, Hot et al, Viteckova y Smith, que han establecido constantes (a,b,c,d) y porcentajes de ubicación en la curva de reacción del proceso ( $p_1$  y  $p_2$ ) estos últimos para encontrar los tiempos de ubicación, y de esta manera poder aplicar las fórmulas que se relacionan en la Ecuación 10 y la Ecuación 11.[15]

$$\tau = at_1 + bt_2$$

Ecuación 10

$$t_m = ct_1 + dt_2$$

Ecuación 11

Los porcentajes del cambio de la respuesta para la determinación de los dos tiempos requeridos por el procedimiento de identificación, así como los valores de las constantes a, b, c y d para los diferentes autores se relacionan en la Tabla 1

Método	%P1	%P2	A	b	c	d
Alfaro	25	75	-0,91	0,91	1,262	-0,262
Broida	28	40	-5,5	5,5	2,8	-1,8
Chen y Yang	33	67	-1,4	1,4	1,5	-0,54
Ho et al	35	85	-0,67	0,67	1,3	-0,29
Smith	28,3	63,2	-1,5	1,5	1,5	-0,5
Viteckova	33	70	-1,245	1,245	1,498	-0,498

Tabla 1 Constantes para la identificación de los modelos de primer orden más tiempo muerto. Fuente: [15]

## 2.4. Sintonización de un controlador

Cuando ya se tiene el modelo de primer orden más tiempo muerto, se pueden encontrar los parámetros de sintonización del controlador, siguiendo formulas estipuladas por diferentes autores, como se había dicho anteriormente los autores más referenciados son Ziegler-Nicholds y Cohen-Coon, razón por la cual sus fórmulas se relacionan en la Tabla 2 y Tabla 3.

Nota: Estas fórmulas son aplicables si la curva de reacción se obtuvo mediante una prueba de lazo abierto.

		Parámetros		
		Kp (Ganancia proporcional)	Ti (Tiempo integrativo)	Td (Tiempo derivativo)
<b>Tipo de controlador</b>	Controlador P	$\frac{1}{k} \left( \frac{tm}{\tau} \right)^{-1}$	-	-
	Controlador PI	$\frac{0.9}{k} \left( \frac{tm}{\tau} \right)^{-1}$	$3.33tm$	-
	Controlador PID	$\frac{1.2}{k} \left( \frac{tm}{\tau} \right)^{-1}$	$2tm$	$\frac{tm}{2}$

Tabla 2 Parámetros de sintonización de Ziegler-Nichols. Fuente: [17]

		<b>Parámetros</b>		
		Kp (Ganancia proporcional)	Ti (Tiempo integrativo)	Td (Tiempo derivativo)
<b>Tipo de controlador</b>	Controlador P	$\frac{1}{k} \frac{\tau}{tm} \left( 1 + \frac{tm}{3\tau} \right)$	-	-
	Controlador PI	$\frac{1}{k} \frac{\tau}{tm} \left( \frac{9}{10} + \frac{tm}{12\tau} \right)$	$tm \left( \frac{30 + 3tm/\tau}{9 + 20tm/\tau} \right)$	-
	Controlador PID	$\frac{1}{k} \frac{\tau}{tm} \left( \frac{4}{3} + \frac{tm}{4\tau} \right)$	$tm \left( \frac{32 + 6tm/\tau}{13 + 8tm/\tau} \right)$	$tm \left( \frac{4}{11 + 2tm/\tau} \right)$

Tabla 3 Parámetros de sintonización de Cohen-Coon. Fuente: [18]

### 3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

#### 3.1. Generalidades de la planta de temperatura Amatrol T5553

Para comenzar, Amatrol es una empresa dedicada al diseño, desarrollo y fabricación de sistemas de aprendizaje en muchas categorías como lo son: mecánica, automática, tecnología verde etc, que tiene como misión capacitar altamente la fuerza de trabajo a nivel mundial con tecnología de vanguardia. [19], por esta razón, la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca, cuenta en su laboratorio de procesos con dos productos de esta empresa, una planta de nivel y otra de temperatura, siendo esta última el foco de este trabajo investigativo, razón por la cual se intenta describirla de la manera más adecuada.

Su nombre es Sistema de Control de Proceso Térmico (*Thermal Process Control System*), su número de modelo es T5553 y de su funcionamiento es preciso decir que, está dedicada a controlar la temperatura de un fluido, mediante el canje de energía que realiza por medio de intercambiadores de calor de placas paralelas con otros fluidos.

En ese contexto, se indica en la Figura 14 la estructura de la planta de temperatura Amatrol T5553.

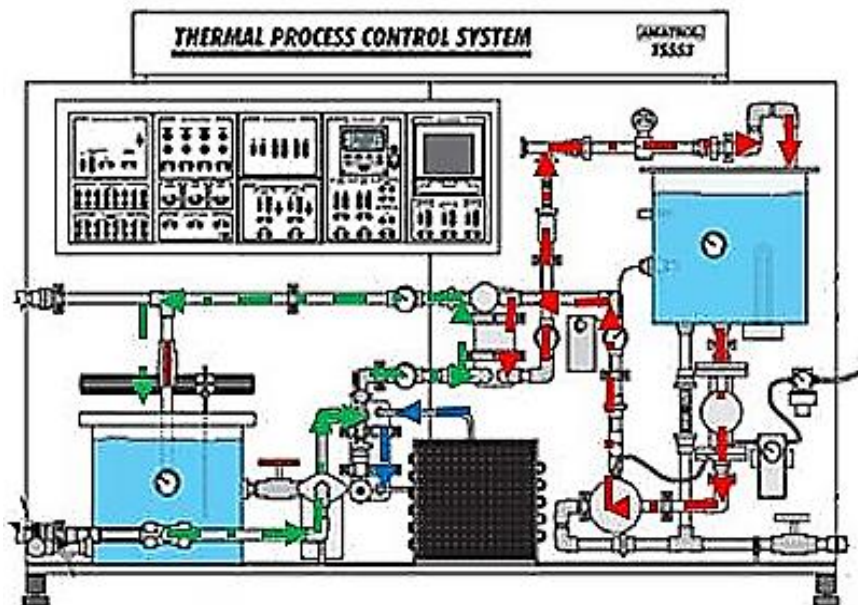
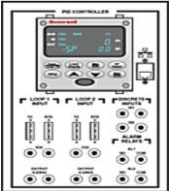

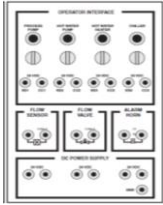

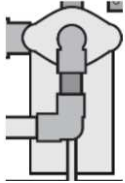
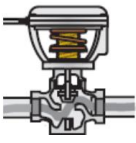
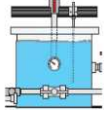


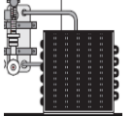
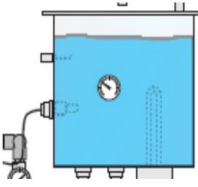



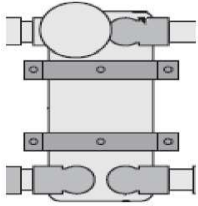


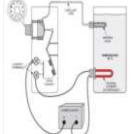
Figura 14 Estructura de la planta T5553 del laboratorio de procesos. Fuente: [20]


De la Figura 14, se aprecia diferentes lazos pintados con color verde, azul y rojo, a continuación se explica cada uno de ellos.

- Lazo principal: (líneas verdes) por este circula el agua del proceso.
- Lazo de calor: (Líneas rojas) por este circula el agua caliente que se encarga de transferir energía al proceso.
- Lazo de enfriamiento: (líneas azul) por este circula gas (Freon "CFC") que se encarga de quitar energía al proceso. Es impulsado por un enfriador.

En la Tabla 4, se describen los componentes más importantes de la planta

Nombre	Fotografía	Descripción
Controlador PID		Es el controlador que posee la planta por defecto y el cual está configurado para realimentarse con los sensores de temperatura y variar una salida en el rango de 4-20 mA.
Panel de entradas y salidas		El panel de dispositivos tiene todas las borneras para la conexión de los elementos, además de la interface con el PLC.
Panel de interface de operador		El panel de interface de operador incluye los selectores para controlar la bomba de circulación, bomba de calentamiento, el calentador y el enfriador, con pilotos de control de cada uno.
Rotámetro		El rotámetro es un indicador mecánico de flujo el cual indica su magnitud con respecto a un flotador interno, y este se desplaza a través de un dial numérico.
Bomba de circulación		Este sistema tiene dos bombas de circulación y su función es impulsar agua a través del lazo en el cual están asignadas, hay una en el lazo de proceso y otra en el lazo de servicio.
Válvula proporcional		Es un actuador neumático que funciona con una presión de 3 a 15psi, es de tres vías y cuando conmuta lo que hace es cambiar el sentido del flujo en el lazo de agua caliente.
Tanque de proceso		Este tanque almacena el agua que va a ser empleada en la simulación del proceso de cambio de temperatura.

Enfriador		Hace fluir un gas Freón a través del intercambiador de calor y se encarga de hacer bajar la temperatura del proceso.
Tanque de calentamiento		Se encarga de almacenar el agua que servirá para calentar el intercambiador de calor, en la parte inferior tiene una resistencia calentadora y en la parte superior un sensor de nivel de seguridad que debe estar siempre activo.
Termistor		Se encarga de medir la temperatura en el tanque de proceso de la planta.
PT 100		Se encarga de medir la temperatura en la salida del intercambiador de calor.
Termocupla		Se encarga de medir la temperatura en la entrada del intercambiador de calor del sistema
Intercambiador de calor		Se encarga de realizar el intercambio térmico entre el enfriador o el lazo de agua caliente con el lazo del proceso, es un intercambiador de placas paralelas lo que significa que está compuesto por varias láminas que aíslan los fluidos pero permiten la conducción térmica.
Convertidor Corriente Presión I/P		Permite convertir la corriente en presión de aire y es el que se encarga de traducir la salida en corriente del controlador a presión de aire para controlar la válvula proporcional
Trasmisor de temperatura		Se encarga de realizar el ajuste lineal de los sensores a una escala medible, es decir traduce la resistencia y mili-voltios de los sensores a un rango medible de 4-20mA y 10-100 ..
Termostato		Es una protección que se encarga de detectar cuando el agua llega al máximo valor permitido, el termostato apaga la resistencia de calentamiento.

Manómetro		<p>Los termómetros en espiral bimetalicos contienen un espiral de la sonda hecho con dos metales diferentes que son unidos. Los dos metales tienen diferentes índices de expansión. El espiral, que está conectado al indicador de temperatura, se expande cuando se calienta. Este termómetro de alimentos detecta la temperatura desde su punta y sube por el tubo de 5 a 6.3 cm. La temperatura resultante es el promedio de la temperatura a lo largo del área de detección.</p>
-----------	---	--

*Tabla 4 Componentes de la planta de temperatura Amatrol T5553. Fuente: [20]*

Por otra parte, ISA (Sociedad de instrumentación de América) dispone de un conjunto de símbolos que tiene como objetivo principal transmitir de forma fácil y específica la información de una planta, esto se hace indispensable para la operación y el mantenimiento de los procesos. Las normas ISA de instrumentación y control se relacionan a continuación.

- ANSI/ISA-S5.1 (Identificación y símbolos de instrumentación)
- ANSI/ISA-S5.2 (Diagramas lógicos binarios para operaciones de procesos)
- ISA-S5.3 (Símbolos gráficos para control distribuido, sistemas lógicos y computarizados)
- ANSI/ISA-S5.5 (Símbolos gráficos para visualización de procesos). [21]

En ese contexto, se muestra en la Figura 15 el diagrama P&ID de la planta de temperatura Amatrol T5553, siguiendo los lineamientos establecidos en la norma ANSI/ISA-S5.1



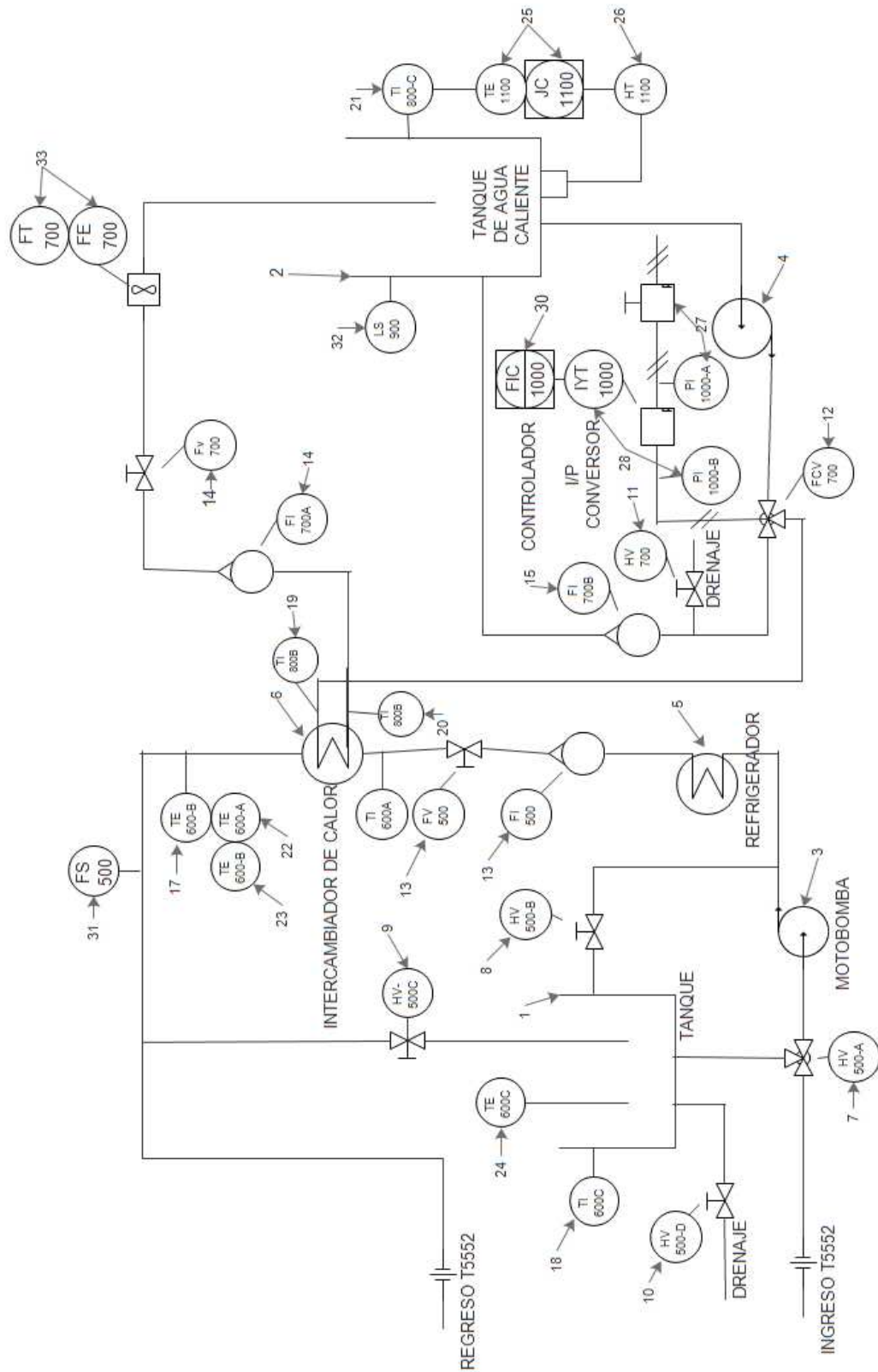


Figura 15 Diagrama P&ID según norma ANSI/ISA-S5.1 de la planta de temperatura Amatrol T5553. Fuente: [20]

A continuación, se muestra en la Tabla 5 la descripción de los símbolos de la Figura 15

<b>Instrumentación planta de temperatura Amatrol T5553</b>		
<b>Numeración</b>	<b>Descripción</b>	<b>Etiqueta del instrumento</b>
<b>1</b>	Tanque del proceso	-
<b>2</b>	Tanque de agua caliente	-
<b>3</b>	Bomba del proceso	-
<b>4</b>	Bomba de agua caliente	-
<b>5</b>	Enfriador	-
<b>6</b>	Calentador	-
<b>7</b>	Válvula manual de tres vías	HV 500-A
<b>8, 9, 10, 11</b>	Válvula manual	HV 500-B, HV 500-C, HV 500-D, HV 700
<b>12</b>	Válvula controladora de flujo	FCV 700
<b>13, 14</b>	Rotámetro	FI 500, FV 500, FI 700-A, FV 700
<b>16, 17, 18, 19, 20, 21</b>	Indicadores de temperatura	FI 700B, TI 600-A, TI 600-B, TI 600-C, TI 800-A, TI 800-B, TI 800-C
<b>22</b>	RTD	TE 600-A
<b>23</b>	Termocupla	TE 600-B
<b>24</b>	Termistor	TE 600-C
<b>25</b>	Termostato con sensor de temperatura	JC 1100 TE 1100
<b>26</b>	Elemento de calefacción	HT 1100
<b>27</b>	Regulador de presión con calibrador	PC 1000 PI 1000-A
<b>28</b>	Convertor de corriente a presión	IYT 1000 PI 1000-B
<b>29</b>	Trasmisor de temperatura	TT 100
<b>30</b>	PID Controller	FIC 1000
<b>31</b>	Conmutador de fluido	FS 500
<b>32</b>	Conmutador de nivel	LS 900
<b>33</b>	Sensor de nivel con trasmisor	FE 700 FT 700

*Tabla 5 Instrumentación planta de temperatura Amatrol T5553. Fuente: [20]*

### 3.2. Implementación

En primera instancia se presenta en la Figura 16, la estructura de control a implementar en la planta de temperatura Amatrol T5553, con respecto, al algoritmo del controlador va a ser un PID porque:

- Es fácil de adaptar a la planta
- En la industria es el tipo de controlador más usado [10]
- Permite variar la estabilidad, velocidad y el área error, variando los parámetros  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$ .

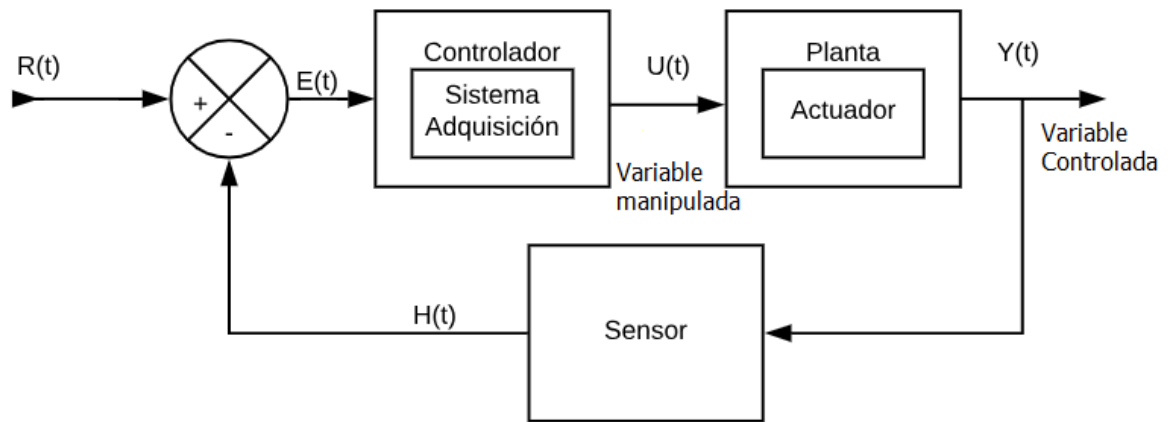


Figura 16 Estructura de control para la planta de temperatura Amatrol T5553. Fuente: Autores

Donde:

$R(t)$ : Referencia

$E(t)$ : Error

$H(t)$ : Señal del sensor

$U(t)$ : Esfuerzo de control

$Y(t)$ : Salida de la planta

Por otro lado, la planta de temperatura Amatrol T5553 cuenta con una variable controlada (Temperatura) y dos variables manipuladas (flujo de agua caliente y flujo de gas Freón CFC), teniendo en cuenta, que la estructura de la Figura 16 permite manipular una sola variable, en este trabajo investigativo se optó por manipular el flujo de agua caliente y tener como condición inicial que el flujo de gas freón siempre sea constante.

### 3.2.1. Sistema de adquisición de datos

El sistema de adquisición de datos establece una comunicación bidireccional entre el controlador y el proceso, hace una conversión análoga-digital de la lectura del sensor para enviarla al software y de este recibe el esfuerzo de control para realizar una conversión digital-análoga.

Se realizó en el software de Sketchup el diseño de la parte frontal del sistema de adquisición de datos, como se presenta en la Figura 17

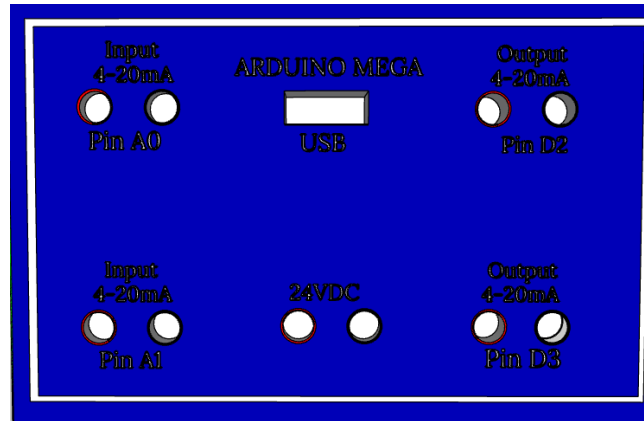


Figura 17 Parte frontal del sistema de adquisición de datos diseñado en el software de Sketchup. Fuente: Autores

En la Figura 18 se muestra el diseño interno del sistema de adquisición de datos.

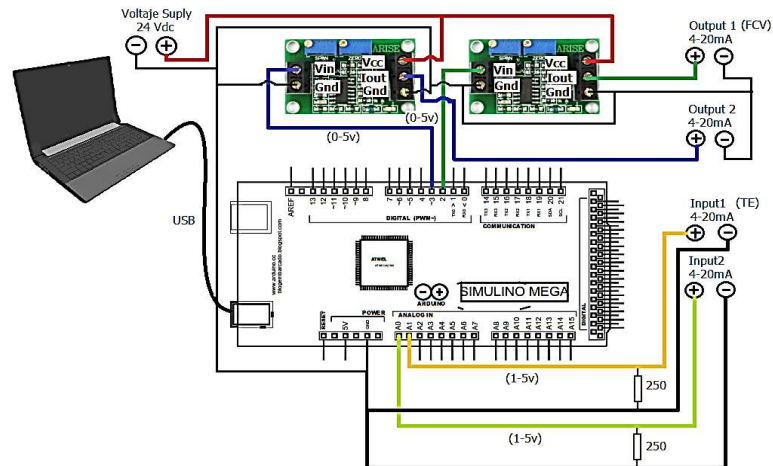


Figura 18 Conexiones internas del sistema de adquisición de datos de la planta de temperatura Amatrol T5553. Fuente: Autores

El sistema de adquisición de datos planteado consta de dos entradas (Input1 y Input 2), que son las encargadas de recibir la señal del sensor de temperatura de la planta Amatrol T5553, esta señal (4-20mA) es convertida por medio de una resistencia a

una señal de 1-5v, con la finalidad de que pueda ser leída por el Arduino, además, cuenta con dos salidas (Output1 y Output2) que son las encargadas de llevar la señal de control desde el Arduino a la válvula controladora de flujo, luego de pasar por una tarjeta que convierte el voltaje de 0-5v a una señal de corriente de 4-20mA, ahora se puede explicar, que el sistema de adquisición de datos cuenta con doble entrada y salida porque se quiso hacer más seguro, ya que algún canal puede fallar por percances inesperados.

Es importante mencionar que el Arduino sirve como un puente, es decir, está programado para recibir por un pin análogo la señal del sensor de temperatura y enviarla al software por comunicación serial, del cual, recibe el esfuerzo de control y lo imprime por un pin digital.

A continuación, se muestra en la Figura 19 y Figura 20 el diseño real del sistema de adquisición de datos y en la Figura 21 como quedo instalado en la planta de temperatura.



*Figura 19 Toma parte frontal del sistema de adquisición de la planta de temperatura Amatrol T5553. Fuente: Autores*



Figura 20 Toma trasera del sistema de adquisición de la planta de temperatura Amatrol T5553. Fuente: Autores.



Figura 21: Instalación del sistema de adquisición de datos en la planta. Fuente: Autores

Acto seguido, se describe de forma breve los componentes que conforman el sistema de adquisición de datos.

### 3.2.1.1. Arduino Mega

Se utilizó esta tarjeta por su costo, porque su velocidad de procesamiento se adecua a las necesidades de control (a pesar de que no es muy alta con respecto a una raspberry), además, se tiene experiencia en el manejo y programación de ella, a continuación, se presenta las principales características:

- Microcontrolador: ATmega2560
- Voltaje de alimentación(Recomendado): 7-12v
- 54 pines digitales de Entrada/Salida (14 de ellos son salidas PWM)

- 16 entradas análogas
- Frecuencia de trabajo: 16MHz
- 256k de memoria flash.

### 3.2.1.2. Circuito conversor de voltaje (0-5v) a corriente (4-20mA)

El propósito de esta tarjeta es convertir la señal de voltaje de la tarjeta Arduino en una señal industrial de corriente (4-20mA), porque el actuador de la planta (válvula proporcional) se acciona con este tipo de señal. En la Figura 22 se muestra la tarjeta y se describen las características de interés para el proyecto.

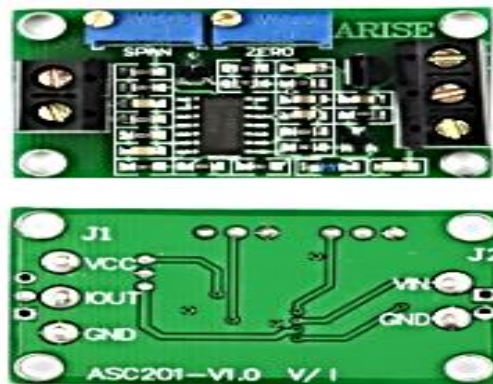


Figura 22 Tarjeta para convertir voltaje (1-5v) a corriente (4-20mA). Fuente: Autores

Características:

Voltaje de alimentación: 0-33v DC

Voltaje de entrada: 0-7v

Corriente de salida: 0-30mA

Es importante resaltar que esta tarjeta cuenta con dos potenciómetros "zero" y "spam" que permiten ajustar la salida de corriente entre un valor máximo y un valor mínimo.

### 3.2.1.3. Circuito conversor de corriente (4-20mA) a voltaje (0-5v)

Para la transformación de corriente (4-20mA) a voltaje (1-5v) se utilizó una resistencia de 250 ohm.

## 3.2.2. PC (Controlador)

El software que se va a utilizar es MATLAB (*Matrix laboratory*), es un programa muy potente, con un entorno agradable, que incluye herramientas de cálculo científico,

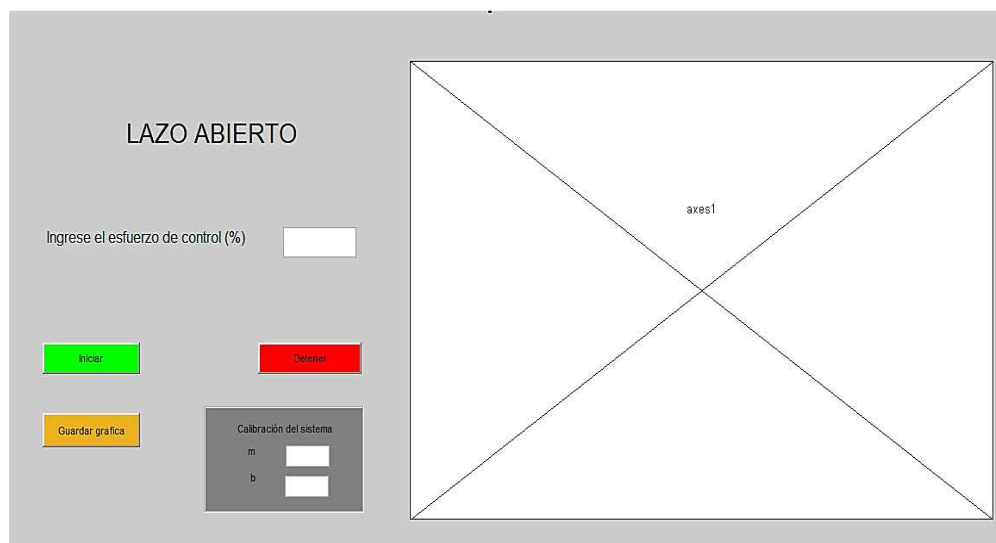
técnico y de visualización gráfica, más aún, posee un lenguaje de programación propio, que se puede realizar por código o por el entorno de diagrama de bloques (Simulink), el cual cuentan con múltiples "toolbox" que permiten realizar diferentes tipos de control, otro rasgo importante es que permite realizar la comunicación con cualquier dispositivo de adquisición de datos, cabe resaltar que la versión utilizada de MATLAB es R2016a. [22]

### 3.2.2.1. Diseño de las interfaces

Se diseñaron dos interfaces de usuario, la primera corresponde a la interfaz para encontrar la curva de reacción del proceso y la segunda permite realizar control, estas se realizaron en la herramienta GUIDE de MATLAB, la cual admite utilizar diversos componentes como: botones de activación, cajas de texto, espacios para graficar entre otros, es importante mencionar, que al terminar de diseñar una interfaz se genera un script donde para cada componente se crea una subfunción editable.

#### 3.2.2.1.1. Interfaz curva de reacción

Para obtener la curva de reacción se diseña la interfaz que se muestra en la Figura 23.



*Figura 23 Interfaz de usuario para obtener la curva de reacción de la planta de temperatura amatrol T5553. Fuente: Autores.*

Para entender el funcionamiento de la interfaz se realiza el diagrama de flujo que se presenta en la Figura 24



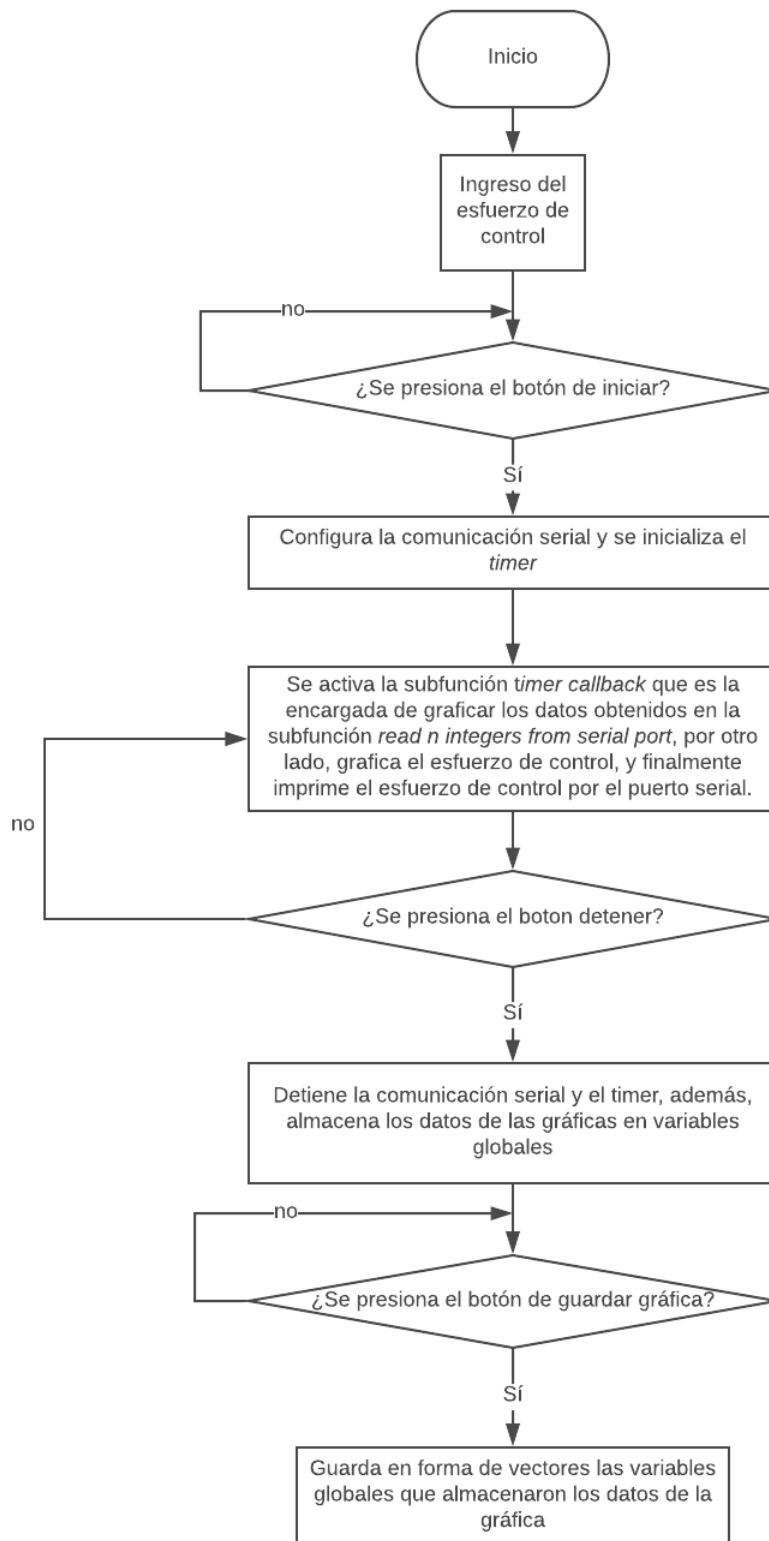


Figura 24 Diagrama de flujo de la interfaz curva de reacción. Fuente: Autores

### 3.2.2.1.2. Interfaz de control

Un sistema de control en tiempo discreto utiliza conversores ADC (*Analog to digital converter*) y DAC (*digital-analog converter*) para la captación de información de la planta, es decir, toma muestras cada cierto tiempo de la variable del proceso, teniendo en cuenta que a la planta de temperatura AMATROL T5553, se le instauro un sistema de adquisición de datos que comunica digitalmente el software de MATLAB con el proceso, el algoritmo de control que se debe emplear es discreto.

El control discreto PID viene dado por la Ecuación 12

$$\frac{u(k)}{e(k)} = \frac{q0 + q1z^{-1} + q2z^{-2}}{1 - z^{-1}}$$

*Ecuación 12*

Donde:

$u(k)$  : Ley de control

$e(k)$  : Error

$$q0 = kp \left[ 1 + \frac{T}{2ti} + \frac{td}{T} \right]$$

*Ecuación 13*

$$q1 = -kp \left[ 1 - \frac{T}{2ti} + \frac{2td}{T} \right]$$

*Ecuación 14*

$$q2 = \frac{Kp td}{T}$$

*Ecuación 15*

Donde:

$T$  : Tiempo de muestreo

$Ti$  : Tiempo integrativo

$Td$  : Tiempo derivativo

$Kp$  : Constante proporcional

Ahora bien, si se despeja  $u(k)$  en la Ecuación 12, se halla la Ecuación 16, correspondiente a la ley de control

$$u(k) = u(k)z^{-1} + q_0e(k) + q_1z^{-1}e(k) + q_2z^{-2}e(k)$$

*Ecuación 16*

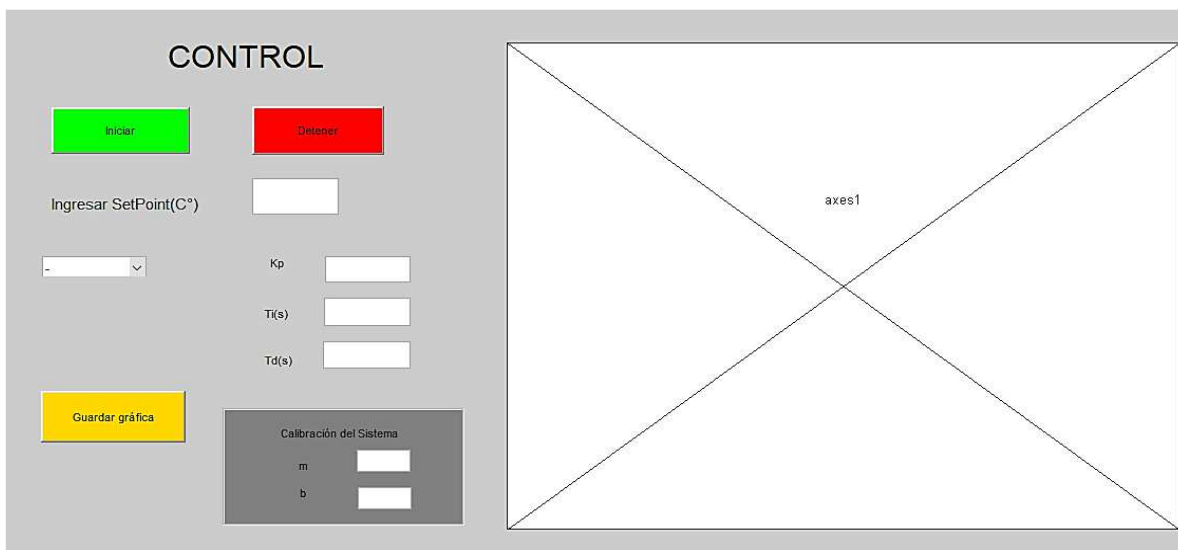
Aplicando la transformada inversa Z, se obtiene en diferencias la Ecuación 17

$$u(k) = u(k-1) + q_0e(k) + q_1e(k-1) + q_2e(k-2)$$

*Ecuación 17*

Así,  $u(k-1)$  es la ley de control un instante de muestreo atrás,  $e(k-1)$  es el error un instante de muestreo atrás y  $e(k-2)$  es el error dos instantes de muestreo atrás.

Acto seguido, en la Figura 25 se muestra la interfaz de usuario para realizar control a la planta.



*Figura 25 Interfaz de control. Fuente: Autores.*

Ahora, se muestra en la Figura 26 un diagrama de flujo, para entender el funcionamiento de la interfaz de control.

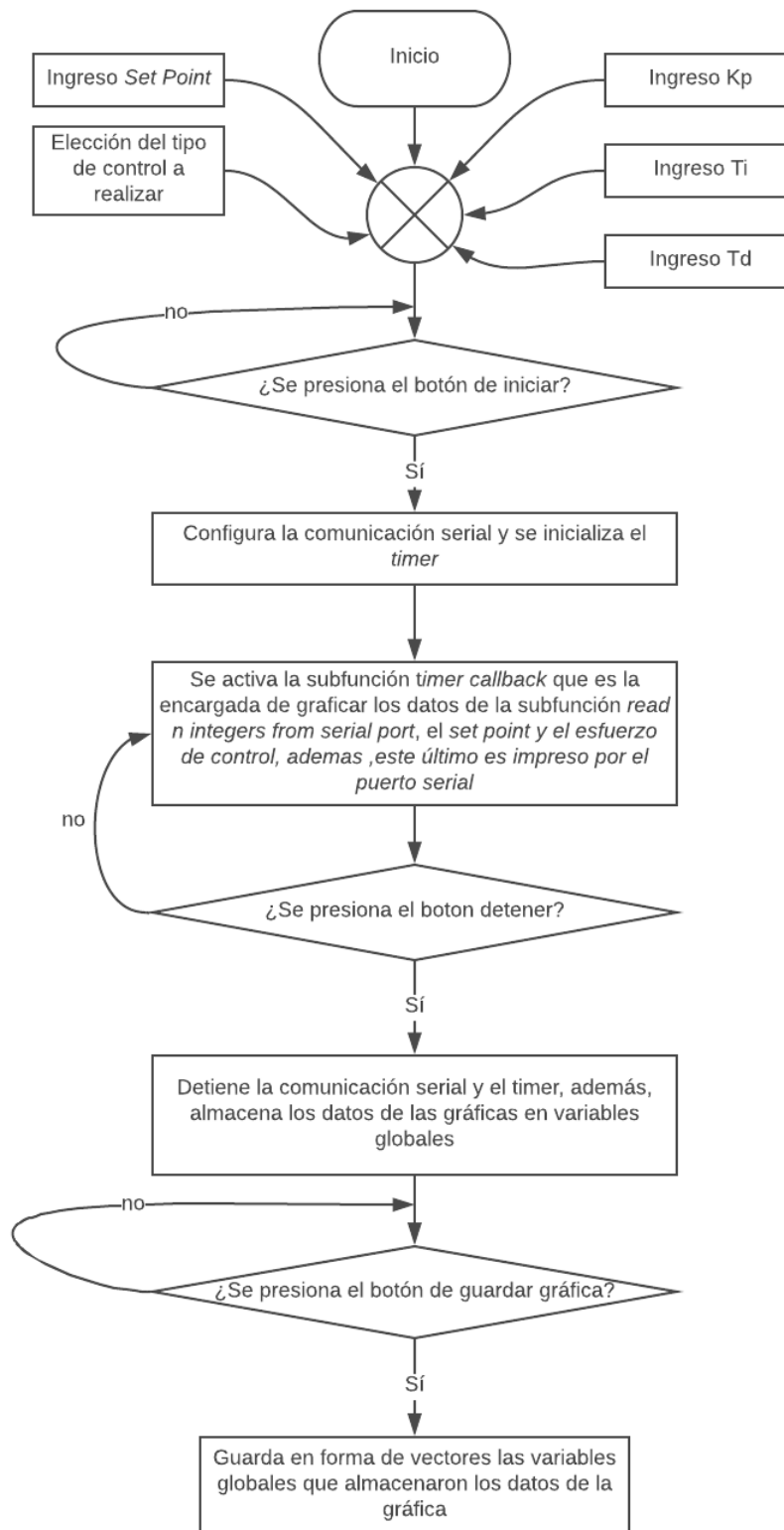


Figura 26 Diagrama de flujo de la interfaz de control. Fuente: Autores

### 3.2.2.2. Estructura de control en Simulink de MATLAB

Teniendo en cuenta que Simulink de MATLAB, permite realizar diferentes operaciones como adquisición de datos, control, entre muchas otras, se decidió plantear una estructura como la que se indica en la Figura 27.

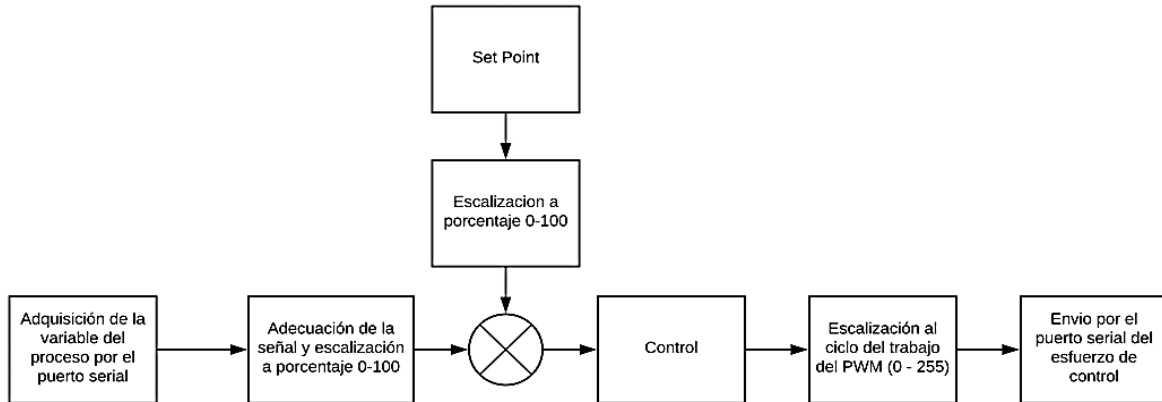


Figura 27 Estructura de control planteada para implementar en Simulink. Fuente: Autores

Ya con el diseño de la Figura 27 Estructura de control planteada para implementar en Simulink. Fuente: Autores, se muestra en la Figura 28 la estructura de control que se realizó en Simulink.

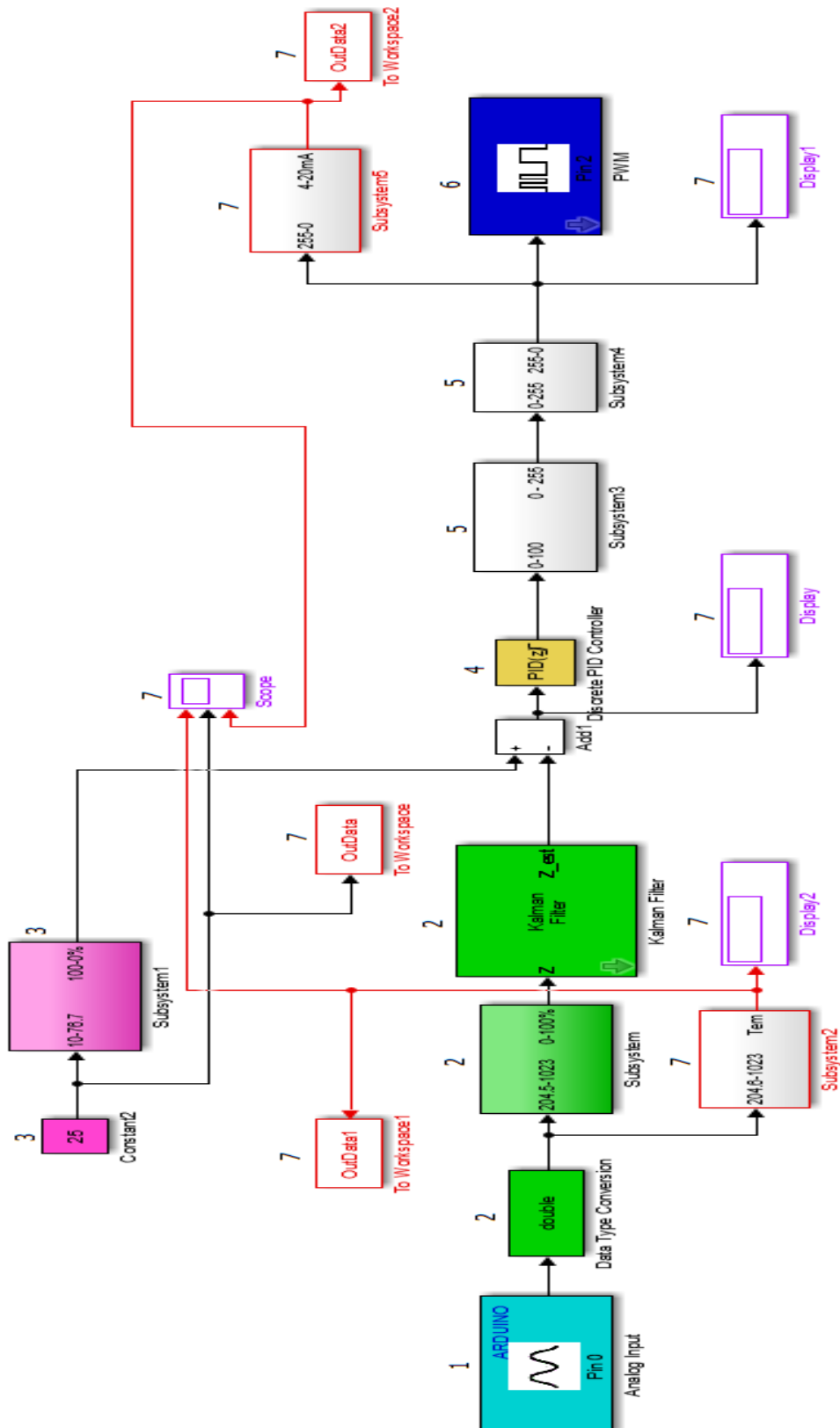


Figura 28 Estructura de control en Simulink de MATLAB. Fuente: Autores.

A continuación, se explica la estructura de control en Simulink teniendo en cuenta los números de la Figura 28.

1. Adquisición de la variable del proceso por el puerto serial: Este bloque es una herramienta de Simulink para captar la lectura que realiza la tarjeta Arduino por el pin analógico, el tiempo de muestreo es configurable y los datos vienen codificados de forma binaria.
2. Adecuación de la señal y escalización a porcentaje 0-100: Este proceso consta de tres subprocesos, en primer lugar se encuentra el bloque denominado "Data type conversión" que es el encargado de cambiar el tipo de dato de binario a entero, es decir, a un valor de 0 a 1023, en segundo lugar aparece el bloque "Subsystem" que tiene como función escalizar el valor de 0 -1023 a porcentaje (0-100%), y en tercer lugar está un filtro de Kalman que se encarga de mejorar la señal.
3. *Set Point* y escalización a porcentaje: El bloque "Constant2" recibe el *Set Point* que ingresa el usuario, este valor debe estar entre 10 -76.7°C porque es el *spam* del sensor termistor. El otro bloque se denomina "Subsystem 1" y se encarga de escalizar el valor de temperatura (10-76.7°C) a porcentaje (0 a 100%).
4. Control: Este bloque es el controlador PID discreto, al cual se le ingresan los parámetros de sintonización, se encuentra saturado de 0 a 100, además, se puede configurar el método de integración, de filtrado y escoger entre la forma serie o paralelo.
5. Escalización al ciclo de trabajo del PWM (bloques de color blanco): Consta de dos bloques, el primero "Subsystem3" convierte el esfuerzo de control que viene del controlador PID discreto (0 -100), al ciclo de trabajo del pin digital del Arduino (0-255) y el segundo "Subsystem4" invierte el valor anterior, es decir si llega 255 saca 0 y si es 0 saca 255, lo anterior se realiza debido a que el actuador de la planta es inverso.
6. Envío del esfuerzo de control por el puerto serial: Es el bloque encargado de sacar por el pin digital del arduino configurado la señal PWM correspondiente al esfuerzo de control.
7. Con respecto a los demás bloques, se utilizan para poder visualizar o guardar los datos, pero no intervienen en el funcionamiento de la estructura de control, en ese orden de ideas el bloque "Subsystem5" escaliza el esfuerzo

de control (255-0) a corriente (4 – 20mA) para luego ser graficado y el bloque "Subsystem2", escaliza el valor digital de la entrada análoga a la temperatura correspondiente con la finalidad de que el usuario pueda visualizar la temperatura del proceso.

### 3.3. Modelo dinámico de la planta a partir del balance de masa y energía

Como se dijo anteriormente, el modelo dinámico de una planta se puede obtener de diferentes maneras, una de ellas es realizar una aproximación matemática del proceso, en ese orden de ideas, para realizar dicho procedimiento en la planta de temperatura Amatrol T5553 es necesario, en primera instancia conocer las variables que en él intervienen. [23] A continuación se relacionan:

**Energía cinética**  $\triangleright k = (Kgm^2 / s^2)$ , *Energía cinética*

**Energía potencial**  $\triangleright \psi = (Kgm^2 / s^2)$ , *Energía potencial*

**Energía interna**  $\triangleright u = (Kgm^2 / s^2)$ , donde  $\rightarrow u = C_e * T$

**C<sub>e</sub>** = calor específico de la materia (J / kg·K)

**P** = Presión (Pa = Kg / ms<sup>2</sup>)

**d** = Densidad (Kg / m<sup>3</sup>)

**G** = Flujo másico (d \* q)

**q** = Caudal (m<sup>3</sup> / s)

**V** = volumen [m<sup>3</sup>]

**Q<sub>r</sub>** = Transferencia de energía debido a una reacción química. = (J)

**Q<sub>c</sub>** = Transferencia de energía debido a ganancia o pérdida de calor = (J)

**W** = Trabajo = (J)



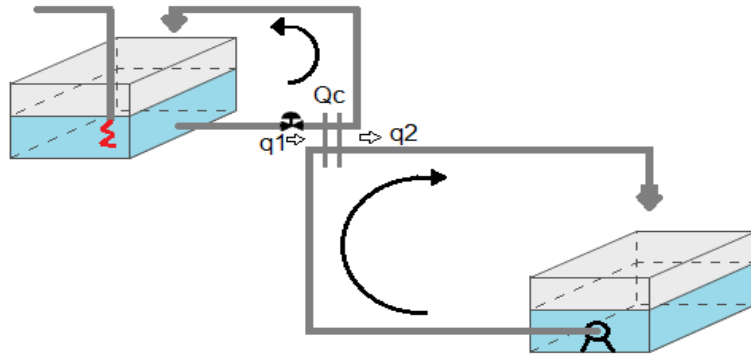
### 3.3.1. Análisis del proceso del intercambiador 1

Se parte de la ecuación general, donde se plantea la variación de la energía respecto al tiempo:

$$\frac{\partial E}{dt} = (k_1 + \varphi_1 + \nu_1 + \frac{p1}{d1}) * G_1 - (k_2 + \varphi_2 + \nu_2 + \frac{p2}{d2}) * G_2 + Q_c + Q_r - W$$

*Ecuación 18*

El intercambiador 1 (ubicado en la parte superior de la planta) está inmerso en el proceso que se presenta en la Figura 29, de acuerdo a este, se descartan algunas variables de la ecuación general, quedando reducida a la Ecuación 19, donde se tiene la variación de la energía respecto al tiempo en términos de la energía interna y de la transferencia de calor.



*Figura 29 Proceso planta intercambiador 1. Fuente: Autores.*

$$\left(\frac{\partial E}{\partial t}\right) = u_1 G_1 - u_2 G_2 + Q_c$$

*Ecuación 19*

Se procede a realizar el análisis, reemplazando el flujo másico "G" y la energía interna "U", por las variables planteadas en la relación anterior. Así, se obtiene la Ecuación 20.

$$\left(\frac{\partial E}{\partial t}\right) = (T_1 - T_2) C_e dq + Q_c$$

*Ecuación 20*

Como la Energía térmica "E" es igual al producto entre la masa "m", el calor específico "C<sub>e</sub>" y la variación de la temperatura "T", entonces tenemos la Ecuación 21, como se muestra a continuación

$$mC_e \left( \frac{\partial T_2}{\partial t} \right) = T_1 C_{e1} d_1 q_1 - T_2 C_{e2} d_2 q_2 + Q_c$$

*Ecuación 21*

$$mC_e \left( \frac{\partial T_2(t)}{\partial t} \right) = T_1(t) C_{e1} d_1 q_1 - T_2(t) C_{e2} d_2 q_2 + Q_c(t)$$

*Ecuación 22*

$$\left( \frac{m}{dq} \right) \left( \frac{\partial T_2(t)}{\partial t} \right) = T_1(t) - T_2(t) + \left( \frac{Q_c(t)}{C_e dq} \right)$$

*Ecuación 23*

$$\left( \frac{m}{dq} \right) \left( \frac{\partial T_2(t)}{\partial t} \right) + T_2(t) = T_1(t) + \left( \frac{Q_c(t)}{C_e dq} \right)$$

*Ecuación 24*

Después de realizar el respectivo análisis y procedimiento desde la Ecuación 21 hasta la Ecuación 24, se llega a la variación de temperatura de salida  $T_2$ , respecto al tiempo, sin embargo, se realiza un análisis en la Ecuación 24 para verificar unidades y así comprobar la igualdad.

$$\left[ \frac{kgS}{kg} \right] \left( \frac{K}{S} \right) + [K] = [K] + \left[ \frac{Q_c(t)}{(JKg / kg \cdot K \cdot S)} \right]$$

*Ecuación 25*

$$\left[ \frac{kgS}{kg} \right] \left( \frac{K}{S} \right) + [K] = [K] + \left[ \frac{Q_c(t)}{(Kgm^2 Kg / kg \cdot K \cdot S^3)} \right]$$

*Ecuación 26*

$$[(K) + [K]] = [K] + \left[ \frac{(Kg m^2 / S^2)}{(m^2 Kg / K \cdot S^3)} \right]$$

*Ecuación 27*

$$[(K) + [K]] = [K] + \left[ \frac{(Kg m^2 KS^3)}{(S^2 m^2 Kg \cdot)} \right]$$

*Ecuación 28*

$$[(K) + [K]] = [K] + [K \cdot S]$$

*Ecuación 29*

Como se observa en la Ecuación 29, es necesario realizar un ajuste en las unidades, realizando el proceso que se muestra a continuación.

$$dq = [kg / s]$$

*Ecuación 30*

$$m = [Kg]$$

*Ecuación 31*

Al realizar el producto de la Ecuación 30 y Ecuación 31 se tiene la Ecuación 32

$$d q/m = [1/S]$$

*Ecuación 32*

Luego, se ajusta la Ecuación 24 reemplazando la Ecuación 32 como se muestra en la Ecuación 33

$$\left(\frac{m}{dq}\right)\left(\frac{\partial T_2(t)}{\partial t}\right) + T_2(t) = T_1(t) + \left(\frac{Q_c(t) d \cdot q}{m C_e dq}\right)$$

*Ecuación 33*

$$\left(\frac{m}{dq}\right)\left(\frac{\partial T_2(t)}{\partial t}\right) + T_2(t) = T_1(t) + \left(\frac{Q_c(t)}{m C_e}\right) \cdot \left(\frac{dq}{dq}\right)$$

*Ecuación 34*

$$\left(\frac{m}{dq}\right)\left(\frac{\partial T_2(t)}{\partial t}\right) + T_2(t) = T_1(t) + \left(\frac{Q_c(t)}{m C_e}\right)$$

*Ecuación 35*

Desde la Ecuación 33 hasta la Ecuación 35, realizamos operaciones de simplificación, llegando así a la Ecuación 36, donde se reemplazan los coeficientes  $(m/dq)$ ,  $1$  y  $(1/C_e m)$  por:  $\tau$ ,  $K_1$  y  $K_2$  respectivamente, como se muestra a continuación en la Ecuación 36.

$$\tau \left(\frac{\partial T_2(t)}{\partial t}\right) + T_2(t) = K_1 T_1(t) + K_2 Q_c(t)$$

*Ecuación 36*

Se aplica la transformada de Laplace a la Ecuación 36, y se obtiene la Ecuación 37

$$\tau S T_2(S) + T_2(S) = K_1 T_1(S) + K_2 Q_c(S)$$

*Ecuación 37*

$$T_2(S)(\tau S + 1) = K_1 T_1(S) + K_2 Q_c(S)$$

*Ecuación 38*

$$T_2(S) = \frac{K_1}{(\tau S + 1)} T_1(S) + \frac{K_2}{(\tau S + 1)} Q_c(S)$$

*Ecuación 39*

Desde la Ecuación 37 hasta la Ecuación 39, se realiza un procedimiento algebraico. Como la transferencia de calor es  $Q_c = mC_e T$ . [23] Entonces se tiene la Ecuación 40.

$$Q_c = dq_2(t)(T_{2(t)} - T_c)C_E$$

*Ecuación 40*

$$Q_c(t) = dq_2(t)(T_{2(t)} - T_c)C_E$$

*Ecuación 41*

$$Q_c(s) = dq_2(s) (T_{2(s)} - T_c)C_E$$

*Ecuación 42*

Se procede a reemplazar la Ecuación 42 en la Ecuación 39 y se obtiene la Ecuación 43

$$T_2(S) = \frac{K_1}{(\tau S + 1)} T_1(S) + \frac{K_2}{(\tau S + 1)} (dq_2(s) (T_2(s) - T_c)C_E)$$

*Ecuación 43*

$$T_2(S) = \frac{K_1}{(\tau S + 1)} T_1(S) + \frac{K_2}{(\tau S + 1)} dq_2(s) T_2(s) C_E - \frac{K_2}{(\tau S + 1)} dq_2(s) T_c C_E$$

*Ecuación 44*

$$T_2(S) - \frac{K_2}{(\tau S + 1)} dq_2(s) T_2(s) C_E = \frac{K_1}{(\tau S + 1)} T_1(S) - \frac{K_2}{(\tau S + 1)} dq_2(s) T_c C_E$$

*Ecuación 45*

$$T_2(S) - \frac{K_2}{(\tau S + 1)} dq_2(s) T_2(s) C_E = \frac{K_1}{(\tau S + 1)} T_1(S) - \frac{K_2 dC_e T_c}{(\tau S + 1)} q_2(s)$$

*Ecuación 46*

Se realiza un análisis y procedimiento desde la Ecuación 43 hasta la Ecuación 46. Posteriormente se asigna a los coeficientes una variable, en este caso "R" y "K<sub>1</sub>".

$$(1 - \frac{K_2}{(\tau S + 1)} dq_2(s) C_E) = R$$

*Ecuación 47*

$$K_3 = K_2 dT_c C_E$$

*Ecuación 48*

Por tanto,

$$T_2(S) = \frac{K_1}{(\tau S + 1) R} T_1(S) - \frac{K_3}{(\tau S + 1) R} q_2(s)$$

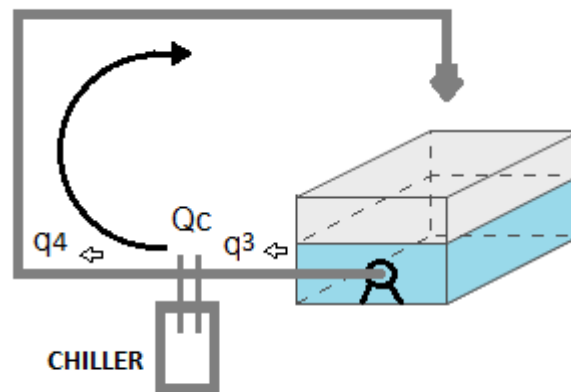
*Ecuación 49*

Se deduce que la Ecuación 49 es de primer orden, además la temperatura de salida del fluido del proceso, va depender del caudal y de la temperatura de entrada.

### 3.3.2. Análisis del proceso del intercambiador 2

El mismo procedimiento se efectúa para el intercambiador número 2, (ubicado en la parte inferior de la planta) la diferencia es que este no transfiere sino que quita energía al proceso, en consecuencia,  $Q_c$  va con signo contrario.

El proceso del intercambiador 2 se puede observar en la Figura 30.



*Figura 30 Proceso planta intercambiador 2. Fuente: Autores*

### 3.3.3. Análisis en el tanque del proceso

Ecuación general.

$$\left(\frac{\partial E}{\partial t}\right) = (k_2 + \psi_2 + \left(\frac{P_2}{d}\right)G_2) - (k_5 + \psi_5 + \left(\frac{P_5}{d}\right)G_5) + Q_c$$

*Ecuación 50*

Teniendo en cuenta que en el tanque del proceso no hay intercambiador de calor, como lo indica la Figura 31, el caudal entra y sale con igual temperatura, en consecuencia, la variación de energía en la Ecuación 50 es nula, es decir  $(\partial E/\partial t) = 0$ .

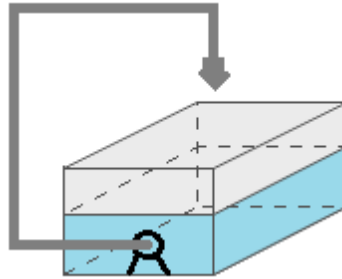


Figura 31 Tanque de Proceso. Fuente: Autores

En ese contexto, se realiza el análisis del flujo másico en la Ecuación 51, donde se muestra la acumulación másica que puede llegar a tener el tanque, dependiendo del caudal másico de entrada-salida, la densidad, el área transversal  $A_T$  por el cual fluye el caudal, y de la altura que alcanza el líquido en el recipiente.

$$\left(\frac{\partial m}{\partial t}\right) = (dq_i - dq_o)$$

Ecuación 51

Como la densidad es igual a la masa dividido el volumen, y el volumen al área por la altura, se reemplaza entonces la variación del flujo másico por el producto entre, la densidad, el área transversal por el cual fluye el caudal y la variación de la altura que alcanza el líquido en el recipiente, por lo tanto tenemos a continuación la Ecuación 52.

$$dA_T \left(\frac{\partial h}{\partial t}\right) = (dq_i - dq_o)$$

Ecuación 52

$$A_T \left(\frac{\partial h}{\partial t}\right) = (q_i - q_o)$$

Ecuación 53

Como el caudal de entrada es el mismo de salida, entonces  $q_i = q_o$ , con lo que se evalúa una posible acumulación del líquido en el recipiente, como se muestra a continuación en la Ecuación 54.

$$A_T \left(\frac{\partial h}{\partial t}\right) = 0, \quad A_T \neq 0, \quad \left(\frac{\partial h}{\partial t}\right) = 0$$

Ecuación 54

De la Ecuación 54 se puede inferir que el área transversal es distinta de cero, en consecuencia, la variación de la altura respecto al tiempo es igual a cero, lo que indica que el caudal se va a mantener con una cierta altura fija durante el proceso.

#### **3.3.4. Consideración.**

En este caso el efecto de la bomba se considera despreciable con respecto al proceso de transferencia de calor, debido a que se encarga solamente de ayudar a circular el flujo a través del sistema.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Elección del sensor de temperatura

La planta de temperatura Amatrol T5553 cuenta con tres sensores para medir la temperatura en el lazo del proceso que son: termocupla, termistor y rtd, a continuación, se presenta en la Figura 32 la ubicación de estos.



Figura 32 Sensores de temperatura en la planta. Fuente: Autores.

Cabe señalar, que cada sensor tiene asociado un termómetro de espiral físico, para indicar la temperatura en el lugar donde está ubicado, además, la termocupla se encuentra inmersa en el lazo del proceso en consecuencia no es visible.

Por otro lado, en la guía G-IE-LCPA-01 de los anexos se enseña el proceso para elegir y calibrar el sensor termistor por medio de un software denominado "INRO IPRO", que permite configurar los rangos de medición como también los rangos de salida de la corriente entre otros parámetros.



## 4.2. Identificación del modelo

En la guía G-IE-LCPA-02 de los anexos se describe el proceso para la identificación del modelo de la planta de temperatura Amatrol T5553 mediante la curva de reacción, además, se detalla de manera teórica los métodos más utilizados para encontrar la función de transferencia, una explicación breve del funcionamiento de la planta, las conexiones necesarias para la prueba y el orden de ejecución del programa en MATLAB.

En ese contexto, para obtener la curva de reacción del proceso es necesario que la planta se encuentre estabilizada, en consecuencia se debe de realizar los siguientes pasos:

- Iniciar el calentador del tanque (Hot wáter eater)
- Graduar la temperatura en el termostato a 130
- Esperar que la temperatura del tanque del lazo de servicio sea aproximadamente 60° C.
- Luego, encender las bombas y el enfriador.

En seguida se compila el programa en MATLAB de la curva de reacción, y se coloca una apertura del 75% a la válvula proporcional, para que pase poco flujo por el lazo de servicio, simultáneamente, en el instrumento FV 700 el flotador interno debe marcar 4 GPM aproximadamente, luego, cuando el proceso se estabiliza en un valor determinado de temperatura, se procede a realizar un cambio en la variable manipulada, no tan brusco pero que aumente el paso de agua, así por ejemplo la apertura de la válvula se cambió del 75% al 30%.

En consonancia con lo anterior, se muestra a continuación, las imágenes tomadas de la interfaz gráfica de usuario donde se visualiza el tiempo y el comportamiento de la temperatura mientras se estabiliza, para luego realizar el cambio en la variable manipulada y obtener la curva de reacción del proceso.

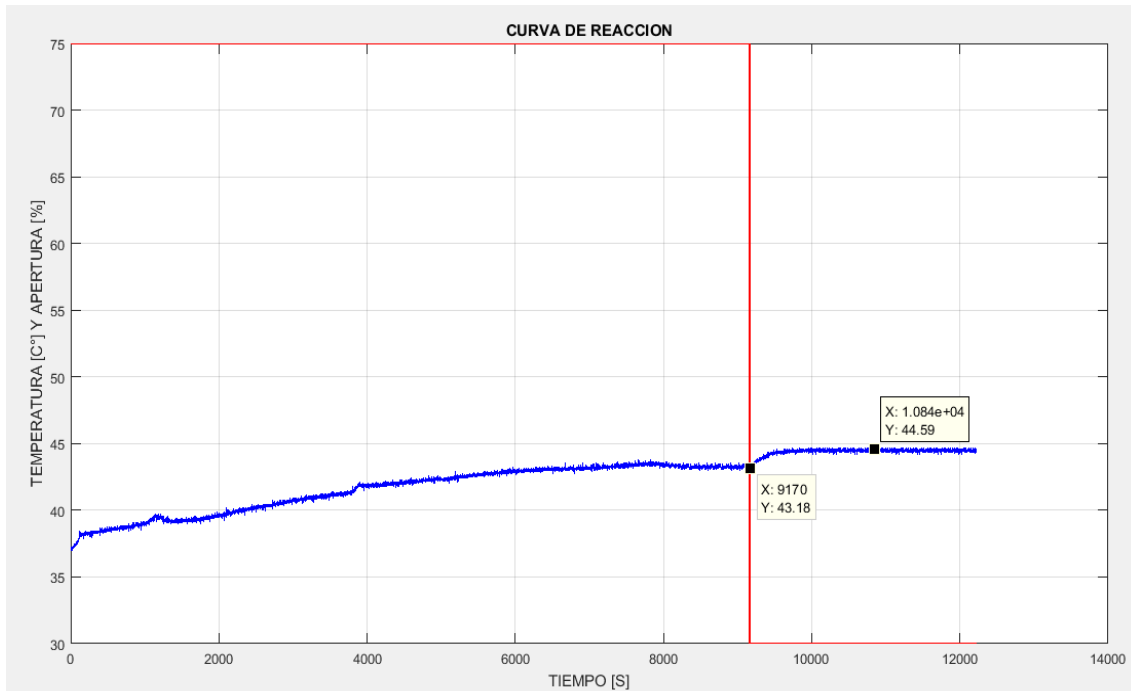


Figura 33 Curva de reacción de la planta de temperatura con un cambio en la variable manipulada de 35%.  
Fuente: Autores

En seguida se describe el análisis que se puede observar a partir de la Figura 33

- Cuando se inició la compilación, la temperatura se encontraba en 37 grados centígrados aproximadamente, antes de llegar a este punto habían transcurrido aproximadamente 3 horas desde que se encendió la planta, es decir que el tiempo total para obtener la curva de reacción fue de 6.3 horas aproximadamente.
- La planta se estabilizó antes de aplicar la señal escalón en 43 grados Celsius aproximadamente, y luego de exitarla se estabilizó en 44.6 grados Celsius.
- Se puede observar que cuando se aplicó la señal escalón, el tiempo de respuesta de la variable controlada es casi nulo, en consecuencia, el tiempo muerto va a ser pequeño.
- La variable controlada tuvo un comportamiento en "S", así las cosas, corresponde a un modelo de primer orden más tiempo muerto y se ratifica los resultados obtenidos mediante el balance masa-energía.

En ese contexto, se recuerda la Ecuación 5, la cual describe un modelo de primer orden más tiempo muerto.

$$G_p(s) = \frac{K_p e^{-tmS}}{\tau S + 1}$$

Para encontrar los valores de la función de transferencia anterior, se utiliza el método de dos puntos generales descrito en el apartado 2.3.1.2.2., el cual utiliza la Ecuación 7, Ecuación 10 y Ecuación 11 para hallar  $K_C$ ,  $\tau$  y  $t_m$  respectivamente, las cuales se recuerdan enseguida.

$$K_C = \frac{\Delta y}{\Delta u}$$

$$\tau = at_1 + bt_2$$

$$t_m = ct_1 + dt_2$$

Hay que recordar que en dicho método diferentes autores han estipulado constantes (a, b, c, d) y porcentajes para ubicar puntos en la curva de reacción y de esta manera obtener los tiempos  $t_1$  y  $t_2$ .

Es importante mencionar que para calcular la ganancia  $K_C$ ,  $\Delta y$  debe estar expresado en porcentaje al igual que  $\Delta u$ , porque el algoritmo de control está configurado en porcentaje y saturado de 0 a 100, en ese contexto para calcular el cambio en % de la variable controlada se debe normalizar respecto al span del dispositivo de medición. El rango de medición del sensor termistor es (10 a 76,7°C), en consecuencia, para hallar el porcentaje del valor inicial de la temperatura en la curva de reacción (43,18), se realiza la siguiente operación.

$$Tem(43,18) = \frac{(43,18 - 10) * 100}{76,7 - 10} = 49,745\%$$

*Ecuación 55*

A sí mismo, para encontrar el porcentaje del valor final de la temperatura en la curva de reacción (44,41), se realiza la siguiente operación:

$$Tem(44,41) = \frac{(44,41 - 10) * 100}{76,7 - 10} = 51,589\%$$

*Ecuación 56*

Por tanto,

$$cambioPV(\%) = 51,589\% - 49,745\% = 1,844\%$$

*Ecuación 57*

Ahora se puede calcular la ganancia  $K_C$

$$K_c = \frac{1,844\%}{30\% - 75\%} = \frac{1,844\%}{-45\%} = -0,0409$$

*Ecuación 58*

Con respecto a  $tm$  y a  $\tau$  se calculan con la Ecuación 10 y Ecuación 11.

Ya con la ganancia, el tiempo muerto y la constante de tiempo de cada autor se muestra en la Tabla 6 los modelos de primer orden más tiempo muerto para cada uno de ellos.

<b>Autor</b>	<b>Función de transferencia</b>
<b>Broida</b>	$Gp(s) = \frac{-0,0409e^{-355,6s}}{60,5s + 1}$
<b>Chen y Yang</b>	$Gp(s) = \frac{-0,0409e^{-57,24s}}{148,4s + 1}$
<b>Ho et al</b>	$Gp(s) = \frac{-0,0409e^{-23,13s}}{223s + 1}$
<b>Smith</b>	$Gp(s) = \frac{-0,0409e^{-2s}}{228s + 1}$
<b>Alfaro</b>	$Gp(s) = \frac{-0,0409e^{-3,65s}}{273s + 1}$
<b>Viteckova et al</b>	$Gp(s) = \frac{-0,0409e^{-6,676s}}{221s + 1}$

*Tabla 6 Modelos de primer orden más tiempo muerto. Fuente: Autores*

Para comprobar cuál es el modelo más aproximado al comportamiento del proceso se realiza una prueba de lazo abierto en Simulink de MATLAB, que consiste en enviar a cada modelo una señal escalón con las mismas condiciones que tiene la variable manipulada en la prueba real de la curva de reacción. Los resultados se comparan en la Figura 34.

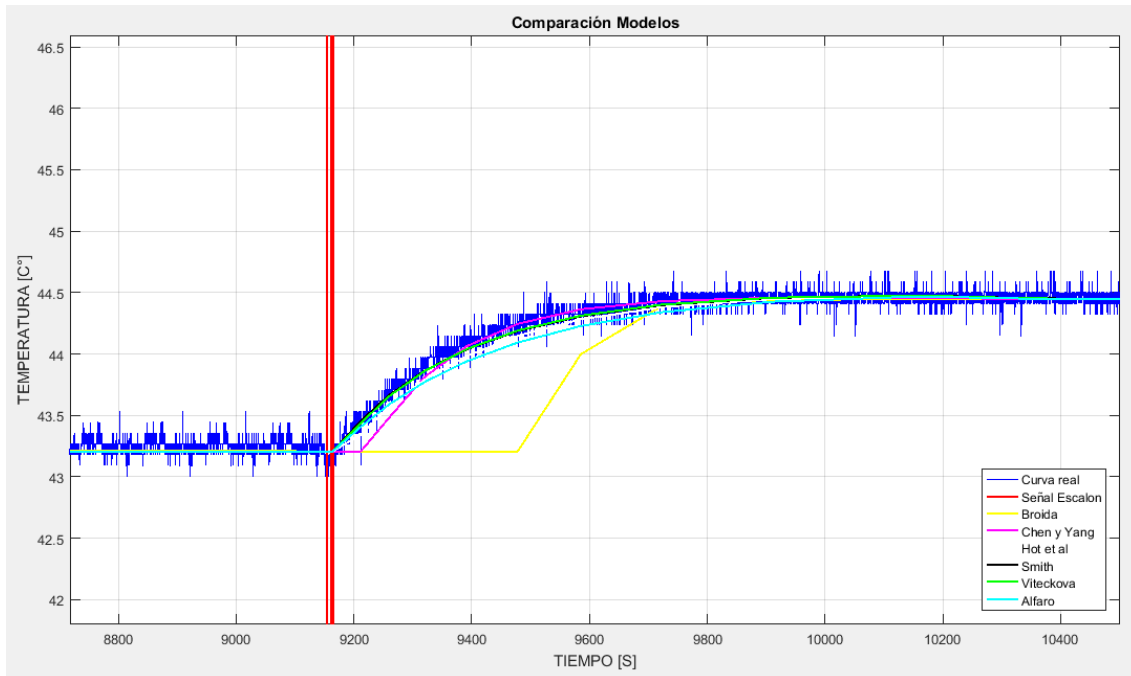


Figura 34 Resultado de la prueba de lazo abierto para cada autor y curva real del proceso. Fuente: Autores.

A partir de la Figura 34, se escoge el modelo de Viteckova porque su comportamiento es muy cercano a la curva del proceso.

### 4.3. Sintonización del controlador

A continuación, se encuentran parámetros de sintonización por medio de tres métodos teóricos, para luego realizar las pruebas de controlabilidad con todos ellos.

#### 4.3.1. Ziegler y Nicholds

Estos autores estipularon dos métodos para sintonizar un controlador PID, la escogencia de uno de ellos depende de la manera en la que se haya tomado la curva de reacción del proceso, es decir, si fue por medio de una prueba de lazo abierto o lazo cerrado, así las cosas, la curva de reacción de la planta de temperatura Amatrol T5553 fue tomada mediante una prueba de lazo abierto, en consecuencia, las fórmulas que se deben utilizar se relacionan en la Tabla 7.

		Parámetros		
		Kp (Ganancia proporcional)	Ti (Tiempo integrativo)	Td (Tiempo derivativo)
Tipo de controlador	Controlador P	$\frac{1}{k} \left( \frac{tm}{\tau} \right)^{-1}$	-	-

	Controlador PI	$\frac{0.9}{k} \left( \frac{tm}{\tau} \right)^{-1}$	$3.33tm$	-
	Controlador PID	$\frac{1.2}{k} \left( \frac{tm}{\tau} \right)^{-1}$	$2tm$	$\frac{tm}{2}$

Tabla 7 Fórmulas de sintonización por el método de Ziegler y Nicholds en lazo abierto. Fuente: [17]

Acto seguido, se reemplaza los valores del modelo de primer orden más tiempo muerto de Viteckova en las fórmulas de la Tabla 7, los resultados se presentan en la Tabla 8.

		Parámetros		
		Kp (Ganancia proporcional)	Ti (Tiempo integrativo)	Td (Tiempo derivativo)
<b>Tipo de controlador</b>	Controlador P	1203,769	-	-
	Controlador PI	-1083,392	22,23	-
	Controlador PID	-1444	13,352	3,338

Tabla 8 Parámetros de sintonización por el método de Ziegler y Nicholds en lazo abierto. Fuente: Autores.

#### 4.3.2. Cohen y Coon

Estos autores también estipularon dos métodos (lazo abierto y lazo cerrado) como Ziegler-Nicholds, las fórmulas que establecieron son las que se presenta en la Tabla 9.

		Parámetros		
		Kp (Ganancia proporcional)	Ti (Tiempo integrativo)	Td (Tiempo derivativo)
<b>Tipo de controlador</b>	Controlador P	$\frac{1}{k} \frac{\tau}{tm} \left( 1 + \frac{tm}{3\tau} \right)$	-	-
	Controlador PI	$\frac{1}{k} \frac{\tau}{tm} \left( \frac{9}{10} + \frac{tm}{12\tau} \right)$	$tm \left( \frac{30 + 3 \frac{tm}{\tau}}{9 + 20 \frac{tm}{\tau}} \right)$	-
	Controlador PID	$\frac{1}{k} \frac{\tau}{tm} \left( \frac{4}{3} + \frac{tm}{4\tau} \right)$	$tm \left( \frac{32 + 6 \frac{tm}{\tau}}{13 + 8 \frac{tm}{\tau}} \right)$	$tm \left( \frac{4}{11 + 2 \frac{tm}{\tau}} \right)$

Tabla 9 Fórmulas de sintonización por el método de Cohen y Coon en lazo abierto. Fuente: [18]

De igual modo, reemplazando los valores del modelo de primer orden más tiempo muerto de Viteckova se obtienen los parámetros de sintonización que se presenta en la Tabla 10.

		Parámetros		
		Kp (Ganancia proporcional)	Ti (Tiempo integrativo)	Td (Tiempo derivativo)
<b>Tipo de controlador</b>	Controlador P	-1215,890	-	-
	Controlador PI	-1086,422	20,916	-
	Controlador PID	-1614,116	16,224	2,41437

Tabla 10 Parámetros de sintonización por el método de Cohen y Coon en lazo abierto. Fuente: Autores.

#### 4.3.3. Autotuning de Simulink.

Para encontrar los parámetros de sintonización del controlador por medio de autotuning fue necesario realizar un esquema de control en Simulink como el que se muestra en la Figura 35.

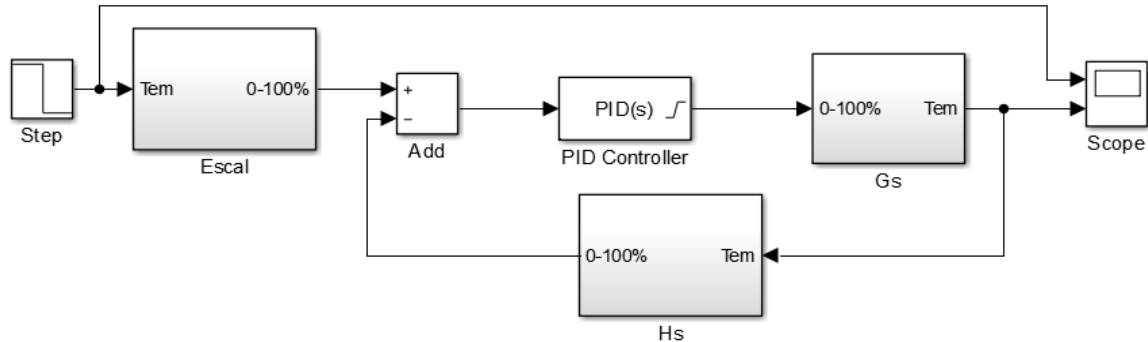


Figura 35 Esquema de control diseñado en Simulink. Fuente: Autores.

A continuación, se procede a explicar cada componente de la Figura 35.

Step: Simula el *Set Point*, está configurado para que realice un cambio de 43 a 45° C.

Escal: Este bloque se encarga de escalar la temperatura (10 - 76.7 °C) a porcentaje (0 a 100%) y está compuesto como se indica en la Figura 36

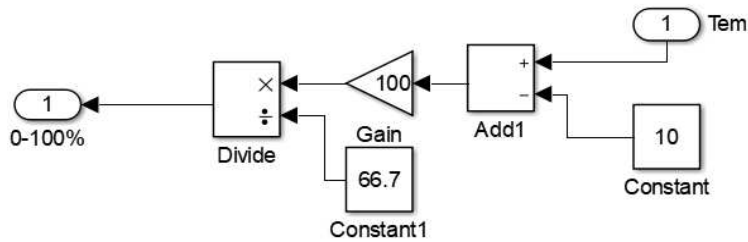


Figura 36 Composición interna del bloque Escal. Fuente: Autores.

Hs: Simula la lectura del sensor, convirtiéndola de grados centígrados (10 - 76.7°C) a porcentaje de (0 – 100%), la composición del bloque es la misma que se muestra en la Figura 36.

PID Controller: Es el controlador y se encuentra saturado de 0 a 100.

Gs: Corresponde al modelo de primer orden más tiempo muerto del Autor Viteckova.

En ese contexto, antes de iniciar la simulación se abrió el bloque PID Controller que contiene la herramienta de "autotune", y se empleó para que encontrara los parámetros de sintonización adecuados en las tres configuraciones posibles (P, PI y PID), además, para corroborar si los valores encontrados fueron correctos se visualizó en el Scope si la variable a controlar seguía la consigna, a continuación se presenta los resultados.

Configuración del controlador	Gráfica
P	
PI	



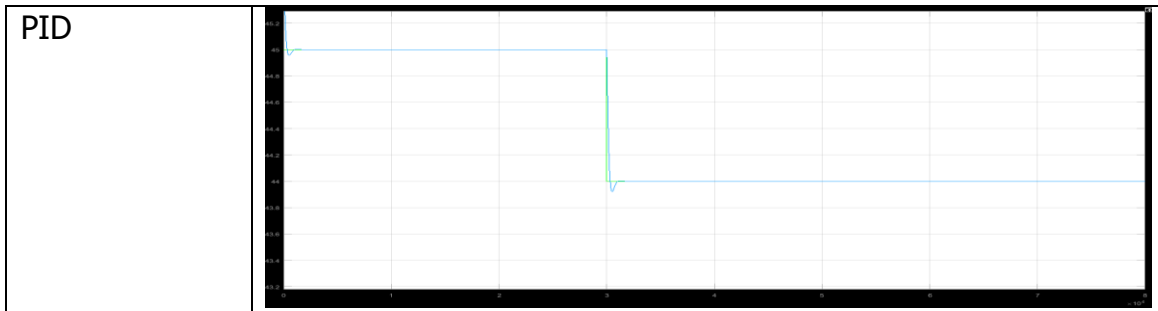


Tabla 11 Respuesta del controlador a un cambio de consigna de 45 a 43°C en diferentes configuraciones.  
Fuente: Autores.

En las gráficas de la Tabla 11 se evidencia que la temperatura (línea azul) realizó el seguimiento al *Set Point* (línea verde), en las tres configuraciones, teniendo en cuenta que los resultados fueron positivos, se muestra en la Tabla 12 los parámetros de sintonización que entrega la herramienta de Autotuning. Conviene subrayar que el Autotuning del controlador entrega los valores en forma de ganancia, en consecuencia para poderlos ingresar a la interfaz de control fue necesario cambiarlos a tiempo, teniendo en cuenta las siguientes formulas. [24]

$$Kp = Kc$$

Ecuación 59

$$Ti = \frac{1}{Ki}$$

Ecuación 60

$$Td = \frac{Kc}{Kd}$$

Ecuación 61

		Parámetros		
		Kp (Ganancia proporcional)	Ti (Tiempo integrativo)	Td (Tiempo derivativo)
<b>Tipo de controlador</b>	Controlador P	-873	-	-
	Controlador PI	-23,098	-4,166	-
	Controlador PID	-29,403	-4,807	-8,555

Tabla 12 parámetros de sintonización encontrados por medio del autotuning de Simulink en unidades de tiempo. Fuente: Autores

#### 4.4. Pruebas de controlabilidad

En primer lugar, antes de realizar las pruebas reales a la planta de temperatura Amatrol T5553, se realizó una prueba de control PID en Simulink, con los parámetros de sintonización de los tres métodos expuestos, el resultado se muestra en la Figura 37.

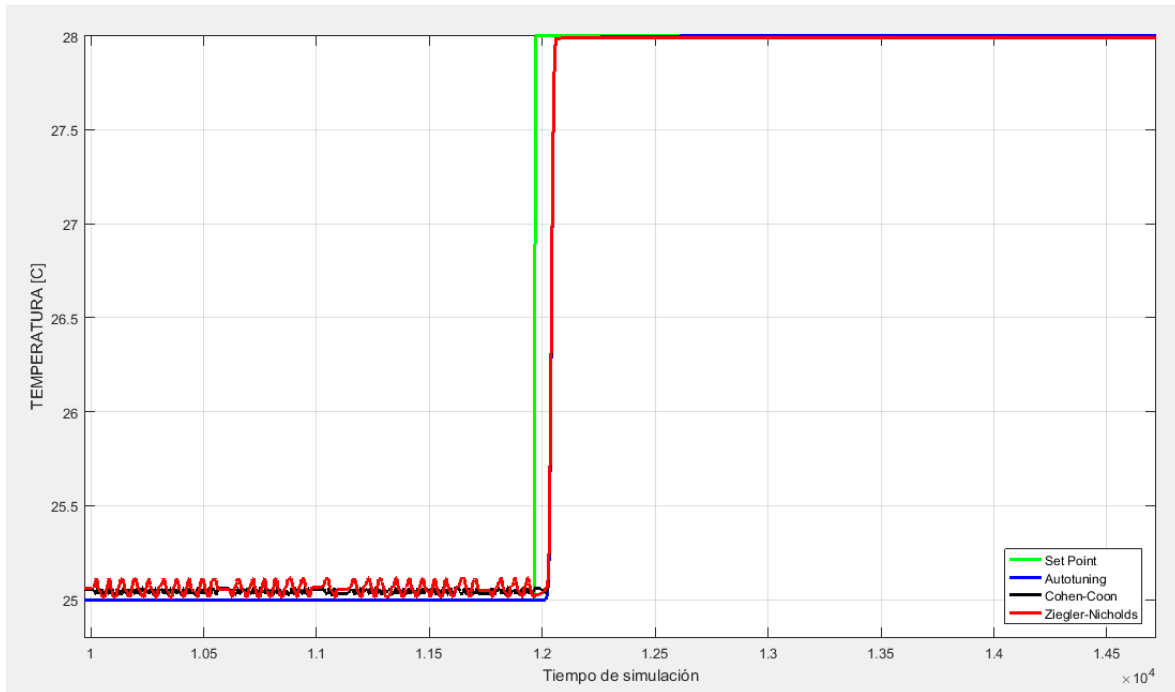


Figura 37 Prueba de control PID para los métodos de sintonización de Ziegler-Nicholds, Cohen-Coon y Autotuning de MATLAB. Fuente: Autores.

En la Figura 37 se puede evidenciar que los parámetros de sintonización encontrados por medio de los tres métodos teóricos funcionan en simulación, porque realizan el seguimiento a la consigna, cabe señalar, que los parámetros más acertados son los de Autotuning, porque no presenta oscilaciones, en comparación con los otros dos métodos.

A continuación, en la Figura 38, Figura 39 y Figura 40 se presenta el esfuerzo de control para los tres métodos teóricos.

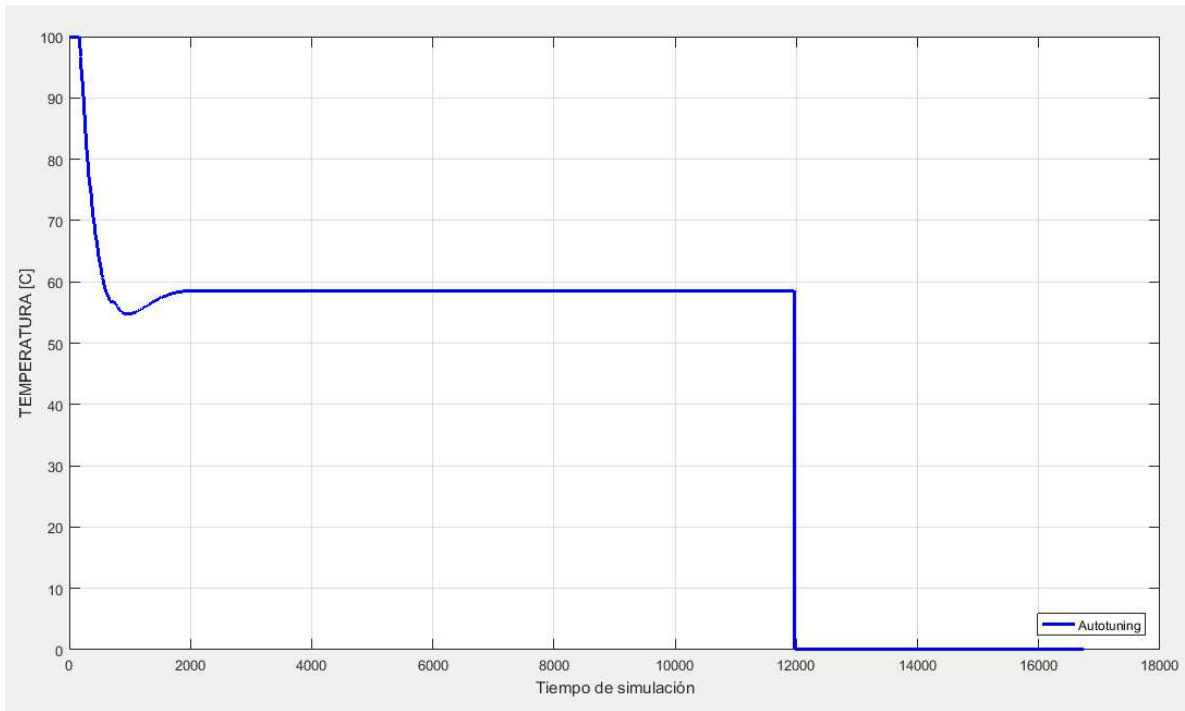


Figura 38 Esfuerzo de control para el métodos teórico de Autotuning. Fuente: Autores.

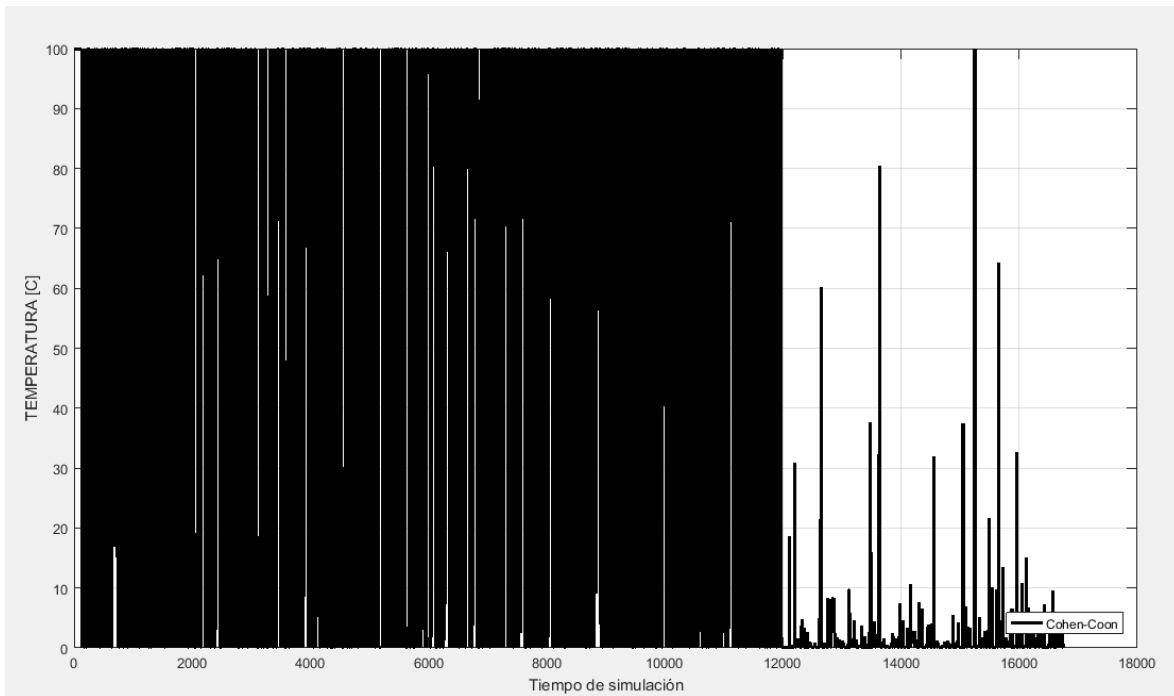


Figura 39 Esfuerzo de control para el métodos teórico de Cohen-Coon. Fuente: Autores.

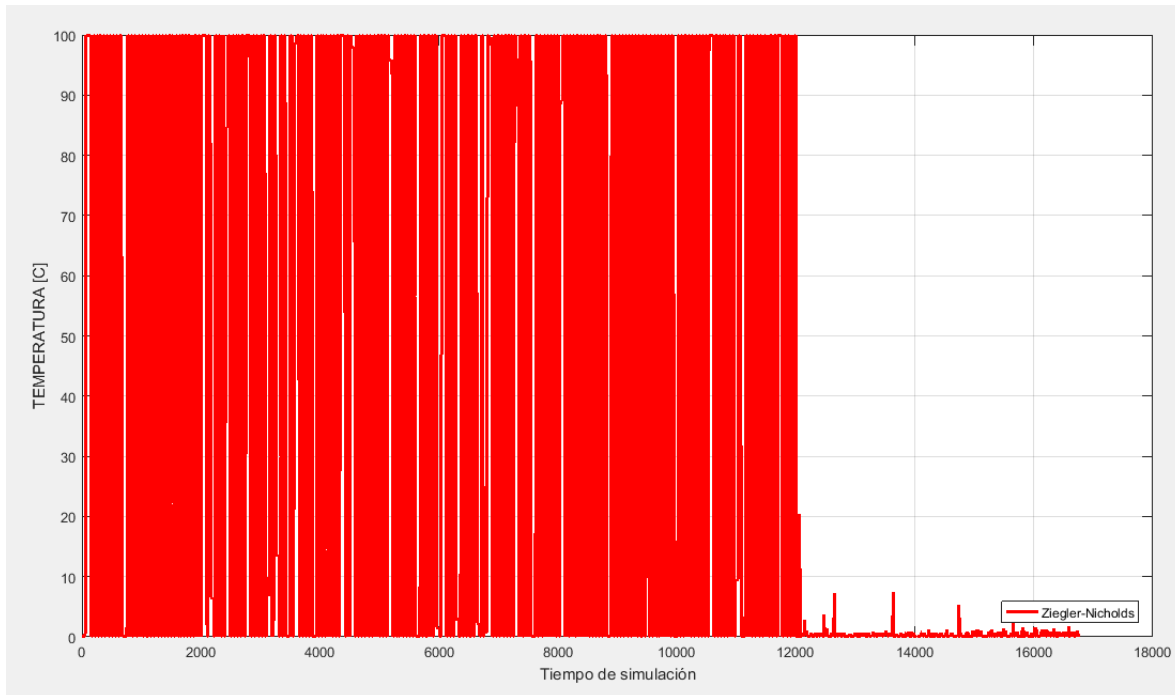


Figura 40 Esfuerzo de control para el métodos teórico de Ziegler-Nicholds. Fuente: Autores.

En la Figura 38 se puede evidenciar que el esfuerzo de control no presenta tantas oscilaciones en comparación con los resultados de la Figura 39 y Figura 40, en consecuencia se prevé que los parámetros de autotuning son la mejor opción para realizar las pruebas de controlabilidad reales, además representarían un ahorro energético al proceso, porque el actuador no estaría en estado ON-OFF.

#### 4.4.1. Prueba real de controlabilidad mediante la interfaz de usuario

En la guía G-IE-LCPA-03 de los anexos se explica el procedimiento para realizar una prueba de controlabilidad mediante la interfaz.

Por otro lado, se probó en la interfaz de control los parámetros de sintonización de los tres métodos teóricos y ninguno funcionó, porque todos hacían que el actuador se abriera y se cerrara bruscamente, razón por la cual, no se muestra resultados.

#### 4.4.2. Prueba real de controlabilidad mediante Simulink

Para realizar las pruebas de controlabilidad en Simulink, fue necesario convertir los parámetros de sintonización de la Tabla 8, Tabla 10 y Tabla 12 a ganancias con la Ecuación 59, Ecuación 60 y Ecuación 61, porque el bloque de control de Simulink recibe los parámetros de esta manera.

En la Tabla 13, Tabla 14 y Tabla 15 se presenta los parámetros de sintonización en ganancias para cada método.

		<b>Parámetros</b>		
		Kp (Ganancia proporcional)	Ki (Ganancia integrativa)	Kd (Ganancia derivativa)
<b>Tipo de controlador</b>	Controlador P	1203,769	-	-
	Controlador PI	-1083,392	0,04498	-
	Controlador PID	-1444	0,07489	-432,594

Tabla 13 Parámetros de sintonización en ganancias por el método de Ziegler y Nicholds. Fuente: Autores

		<b>Parámetros</b>		
		Kp (Ganancia proporcional)	Ki (Ganancia integral)	Kd (Ganancia derivativa)
<b>Tipo de controlador</b>	Controlador P	-1215,890	-	-
	Controlador PI	-1086,422	0,0478	-
	Controlador PID	-1614,116	0,06163	-668,516

Tabla 14 Parámetros de sintonización en ganancias por el método de Cohen y Coon. Fuente: Autores

		<b>Parámetros</b>		
		Kp (Ganancia proporcional)	Ki (Ganancia integral)	Kd (Ganancia derivativa)
<b>Tipo de controlador</b>	Controlador P	-873	-	-
	Controlador PI	-23,098	-0,240	-
	Controlador PID	-29,403	-0,2080	251.39

Tabla 15 Parámetros de sintonización en ganancias por el método de Autotuning. Fuente: Autores

Sin ir más lejos, se procede a realizar las pruebas reales de control, con el esquema de Simulink, es importante mencionar que en la guía G-IE-LCPA-04 de los anexos se

explica el procedimiento para realizar la prueba, por ende se procede a mostrar los resultados en la Tabla 16.

Método	Prueba de control PID
Ziegler y Nicholds	
Cohen y Coon	

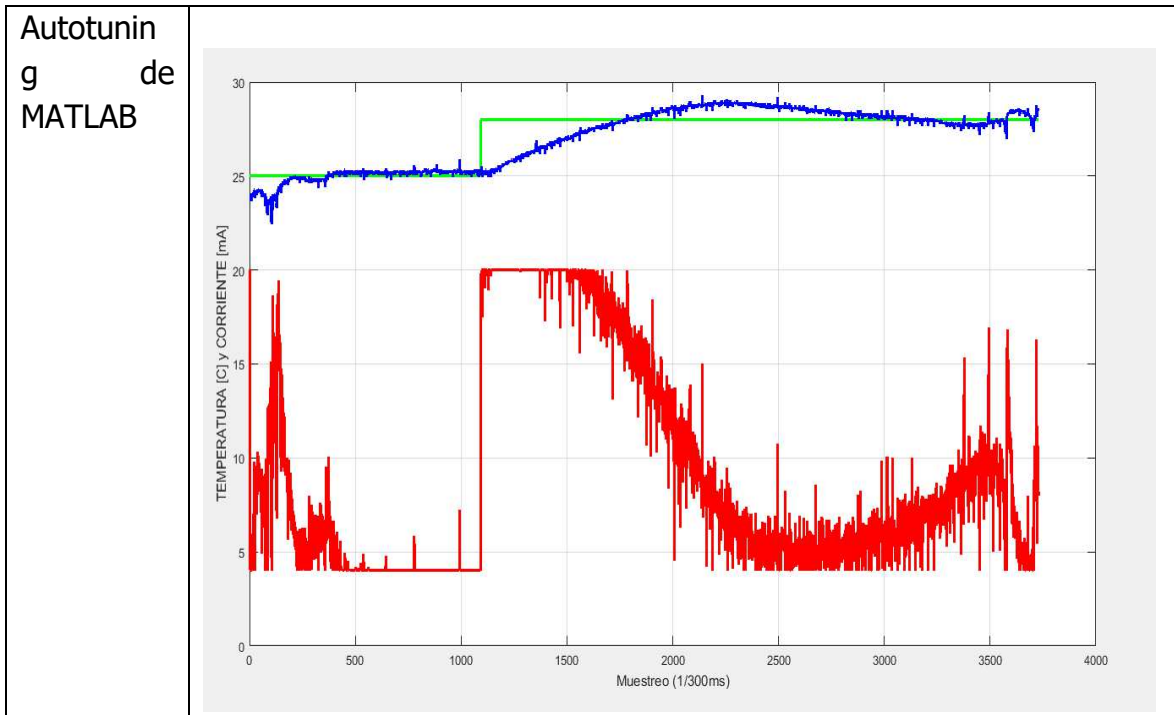


Tabla 16 Resultados de pruebas reales a la planta de temperatura Amatrol T5553 mediante el esquema de Simulink. Fuente: Autores

En la Tabla 16 se puede evidenciar que en los tres métodos la temperatura del proceso siguió la consigna, la cual tiene un cambio de 25°C a 28°C, se hizo de esta forma con la finalidad de realizar la misma prueba de la simulación.

En el primer método que fue el de Ziegler-Nicholds, la temperatura siguió el *Set Point*, ahora bien, estos parámetros de sintonización hacen que el controlador no se comporte como PID sino como un control ON\_OFF, ya que cuando la variable del proceso alcanza la consigna deseada la válvula se abre o se cierra completamente y no regula, lo anterior, representa un inconveniente, este comportamiento se debe a que la ganancia proporcional es demasiado baja.

En el segundo método que fue el de Cohen-Coon se evidencia que la temperatura sigue al *Set Point*, pero el controlador se sigue comportando de forma ON\_OFF, además, ganancia proporcional sigue siendo demasiado baja.

En el tercer método que es el de Autotuning, la variable controlada sigue la consigna, más aun, el esfuerzo de control se comporta adecuadamente, es decir se va regulando cuando el error va disminuyendo, razón por la cual se puede decir que este método es el más acertado de los tres, además la ganancia proporcional es mucho mayor que en los anteriores métodos.

Por otro lado, teniendo en cuenta los resultados de las pruebas de controlabilidad tanto en la interfaz de usuario como en Simulink, se decidió realizar un pequeño

ajuste a los parámetros de sintonización proporcionados por el método de autotuning ya que fueron los que mejor funcionaron en la simulación, lo anterior con la finalidad de obtener unos mejores resultados.

Para la prueba en la interfaz de usuario se ajustaron los valores como se indica en la Tabla 17.

Parámetros de sintonización	
Método de Autotuning [tiempo]	Ajustados
$Kp = -29$	$Kp = -20$
$Ti = -4.807$	$Ti = 5$
$Td = -8.555$	$Td = 0,0002$

Tabla 17 Ajuste de parámetros de sintonización para la interfaz de control. Fuente: Autores

Y se realizó la prueba de controlabilidad PID que se muestra en la Figura 41.

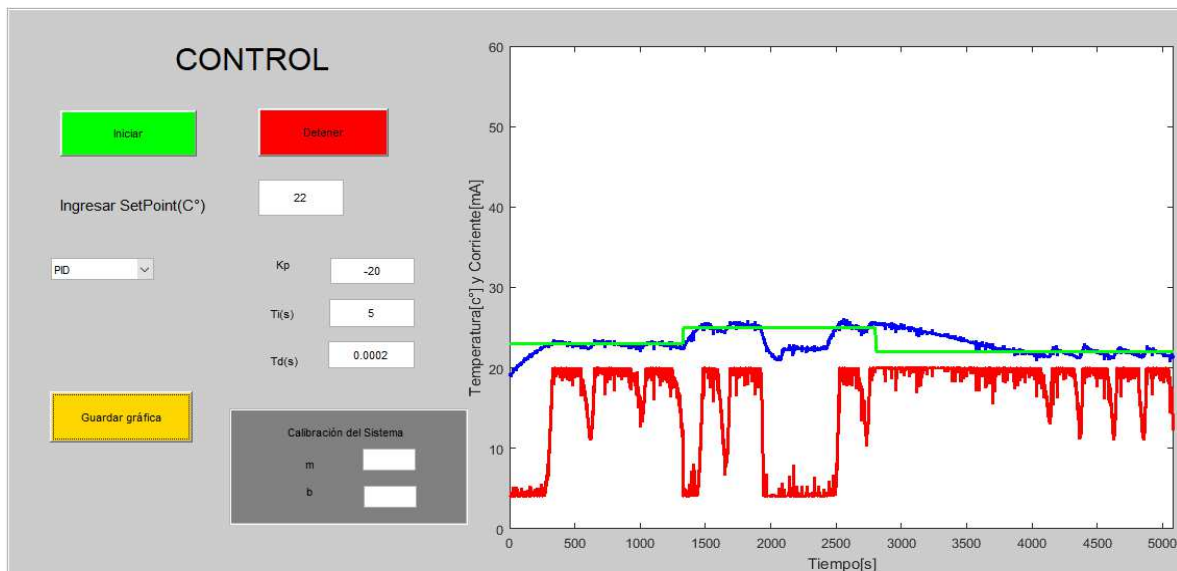


Figura 41 Prueba de controlabilidad en la interfaz con parámetros de sintonización basados en el método teórico de autotuning. Fuente: Autores.

En la Figura 41 se puede observar que se realizó en primera instancia un cambio de 23°C a 26°C y al ver que el proceso respondía adecuadamente, se simuló una perturbación en el segundo 2000 aproximadamente, que consistió en cambiar el agua del tanque del proceso de forma manual por una de menor temperatura, el controlador trató de corregir este error como se puede evidenciar, luego, se realiza otro cambio de consigna de 26°C a 23°C y se finaliza la simulación a la hora y 20 minutos de iniciada, es importante mencionar, que el esfuerzo de control se comportó adecuadamente y se va regulando a medida que el error va disminuyendo.



En la prueba de control de Simulink (Tabla 16) se puede observar que los parámetros de sintonización proporcionados por el método de Autotuning dieron la mejor respuesta, sin embargo, el sobre impulso es alto lo que ocasiona que el tiempo de estabilización también sea grande, razón por la cual se decidió realizar un pequeño ajuste con la finalidad de minimizar estas inconsistencias.

Se ajustaron los valores como se indica en la Tabla 18

Parámetros de sintonización	
Método de Autotuning [ganancias]	Ajustados
$Kp = -29$	$P = -29$
$Ti = -0,2080$	$I = 0,0276$
$Td = 251,99$	$D = 200$

Tabla 18 Ajuste de parámetros de sintonización para Simulink. Fuente: Autores

Y se realiza la prueba de controlabilidad que se muestra en la Figura 42.

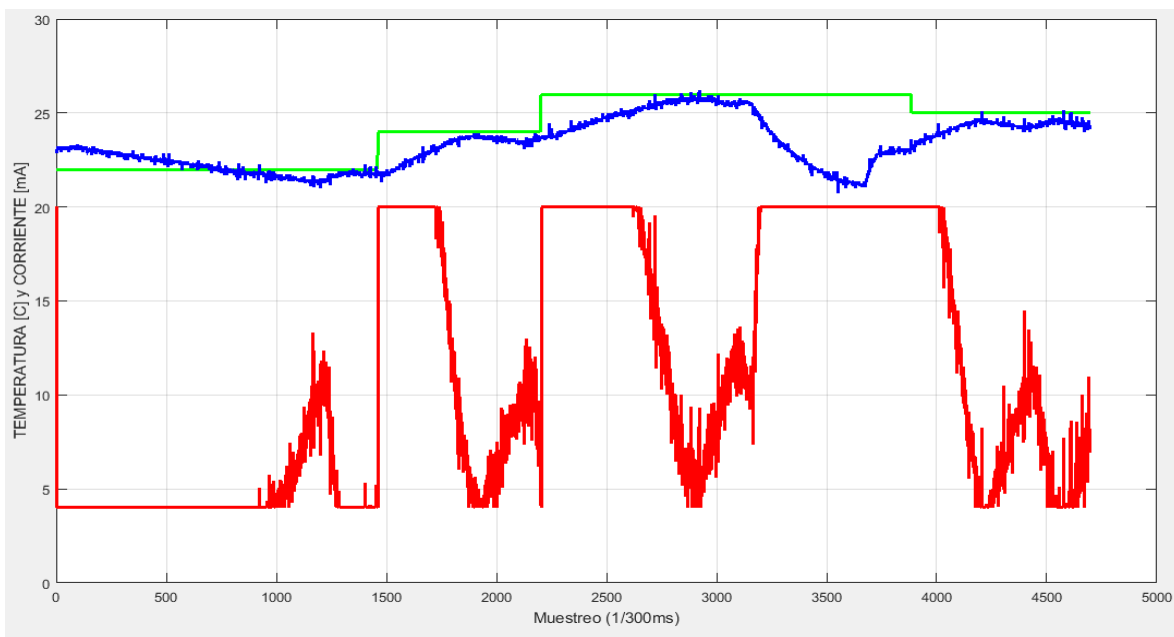


Figura 42 Prueba de controlabilidad en Simulink con parámetros de sintonización basados en el método de autotuning. Fuente: Autores.

En la Figura 42 se puede observar que la variable del proceso sigue al *Set Point*, también que el esfuerzo de control se regula y que el sobre impulso al igual que el tiempo de estabilización disminuyeron, razones por las cuales se aplicó una perturbación que consistió en apagar la bomba del lazo de servicio (HOT WATER EATER) aproximadamente en la muestra 3100, se puede evidenciar que la temperatura empieza a bajar súbitamente y el esfuerzo de control se coloca en 20 mA, es decir, abre completamente la válvula para que pase agua caliente( lo que es

imposible ya que la bomba se encuentra apagada), luego, en la muestra 3600 aproximadamente se enciende nuevamente la bomba del lazo de servicio y la temperatura del proceso empieza a subir.

## 5. RECOMENDACIONES

- 5.1. El termostato se debe configurar a menos de 60°C para realizar las pruebas de control, debido a que si se excede este límite, la tubería del lazo de servicio se empieza a calentar, lo que imposibilita que el enfriador baje la temperatura del proceso, incluso, si la válvula proporcional no está dejando pasar el agua caliente, para corroborar lo anterior se muestra la figura 43, en la cual se puede apreciar que la temperatura (línea roja), no realiza el seguimiento a la consigna (línea azul) aunque el esfuerzo de control (línea verde) estuviese en 20mA lo que quiere decir que la válvula proporcional estaba cerrada, además, se esperó un tiempo prudente para ver si la acción del enfriador ganaba, sin embargo, la temperatura empezó a incrementar.

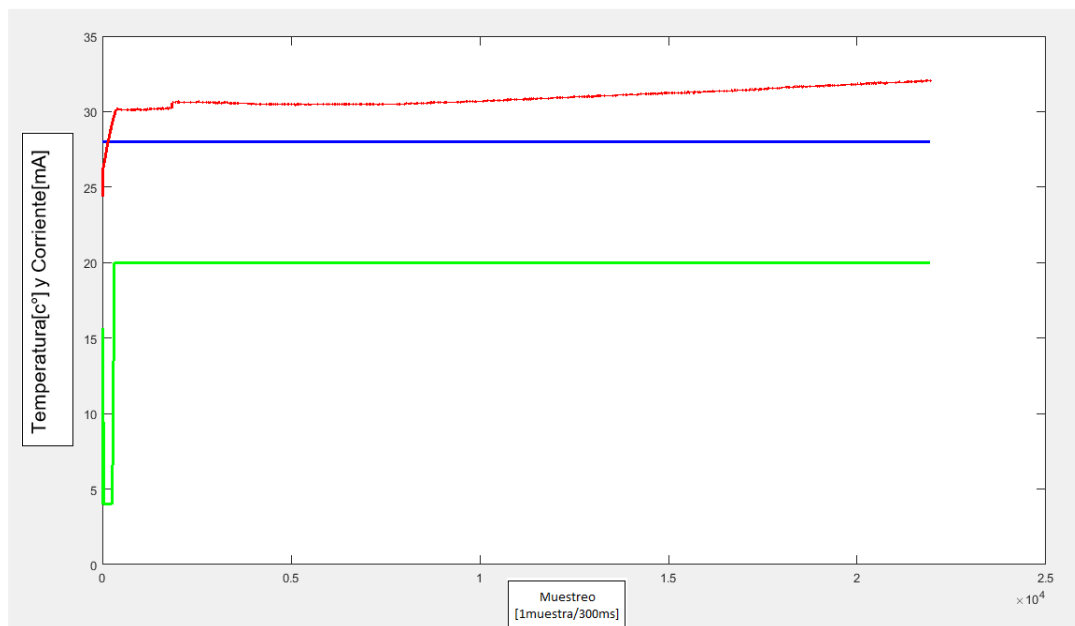


Figura 43 Prueba de control, con el termostato configurado a más de 60 °C. Fuente: Autores

- 5.2. Cuando se quiera realizar la perturbación a la planta del cambio del agua del proceso de forma manual, es necesario apagar la bomba del proceso y el enfriador debido a que si no se apaga en el momento que se extraiga el agua, la motobomba puede succionar aire y se puede dañar.

## 7. CONCLUSIONES

1. Se implementó un algoritmo de control PID, en Simulink y en código, que tiene aproximaciones diferentes para cada caso, razón por la cual, los parámetros de sintonización que sirven para uno no funcionan para el otro, en ese contexto, ambas estructuras funcionan correctamente y llevan el proceso a un valor de operación deseado con un esfuerzo de control regulado, que trae consigo un ahorro energético a la planta.
2. Para realizar el acoplamiento de las señales entre el software MATLAB y el proceso, se implanto en la planta un sistema de adquisición de datos, que se puede utilizar en todo proceso que maneje señales de 4-20mA, la única restricción que tiene es que el muestreo no debe exceder la capacidad de procesamiento de la tarjeta de adquisición de datos (Arduino) que tiene inmersa, que es de 1/20 MHz.
3. Se realizaron 4 guías para que los estudiantes realicen la calibración del sensor termistor, obtengan la curva de reacción y hagan pruebas de controlabilidad por código o Simulink.
4. El método de sintonización de autotuning de MATLAB, fue el más acertado, ya que el esfuerzo de control se regulaba, sin embargo, el tiempo de estabilización y el sobre impulso era grande, razón por la cual, se ajustaron mínimamente estos valores y se pudo obtener una mejor respuesta (con meno sobre impulso y menos tiempo de estabilización)

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] "IEEE Control Systems Society," *Brief history of control*. [Online]. Available: <http://www.ieeecss.org/general/brief-history-control>.
- [2] R. Widodo, "Control Systems in Our Daily Life," *Control system in our daily life*, pp. 9–16, 2008.
- [3] "LAYGO GASKETS," *Aplicaciones de los intercambiadores de calor a placas*, 2009. [Online]. Available: <http://www.laygo.es/es/3732/aplicaciones.htm>.
- [4] O. A. Jaramillo, "Intercambiadores de Calor," 2007.
- [5] M. González, "Intercambiadores de calor," in *Operaciones unitarias I*, 2012, pp. 1–45.
- [6] O. Aduvire, "Intercambiadores de calor," in *Diseño de equipos e instalaciones*, 2014, pp. 2–53.
- [7] "Top Chiller International," *Plate heat exchanger*. [Online]. Available: [http://www.topchiller.com/product\\_plate-heat-exchanger\\_17430.html](http://www.topchiller.com/product_plate-heat-exchanger_17430.html).
- [8] B. C. Kuo, "Sistemas de control automatico 7ma edicion." 2007.
- [9] J. Cifuentes, "Ingeniería de Control," *ResearchGate*, no. December, 2015.
- [10] Castaño Giraldo Sergio Andres, "Control Automático Educación," *Control de procesos*, 2016. [Online]. Available: <https://controlautomaticoeducacion.com/>.
- [11] E. Ostertag and E. Godoy, "RST-controller design for sinewave references by means of an auxiliary diophantine equation," *Proc. 44th IEEE Conf. Decis. Control. Eur. Control Conf. CDC-ECC '05*, vol. 2005, no. 4, pp. 6905–6910, 2005.
- [12] D. E. Seborg, T. F. Edgar, and D. a. Mellichamp, "Model Predictive Control," in *Process Dynamics and Control*, 2011, pp. 414–438.
- [13] K. J. Astrom, "PID CONTROL," in *Control Systems Design*, vol. 26, no. 1, 2006, pp. 216–251.
- [14] K. Ogata, *Ingeniería de Control Moderna*, vol. 53, no. 9. 2013.
- [15] M. M. Alfaro, "Identificación de procesos sobreamortiguados utilizando tecnicas de lazo abierto," *Ingeniería*, vol. 11, pp. 70–75.
- [16] F. Haugen, "Article : Ziegler-Nichols ' Open-Loop Method", 2010.
- [17] C. A. Smith, *Control Automatico de Procesos Teoria y Practica*. .
- [18] D. R. Coughanowr and S. E. Leblanc, *Process Systems Analysis and Control*.

2008.

- [19] "Amatrol," *who we are*. [Online]. Available: <https://amatrol.com/>.
- [20] Amatrol, *INSTALLACION GUIDE FOR T5553-BE THERMAL PROCESS CONTROL LEARNING SYSTEM*. 2010.
- [21] "ISA," *symbols, Terminology and Docuementation*. [Online]. Available: <https://www.isa.org/>.
- [22] "MATHWORKS," *What is MATLAB*. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/discovery/what-is-matlab.html>.
- [23] Y. Cengel and Michael Boles, *Termodinamica* .
- [24] "NATIONAL INSTRUMENTS," *Conversion de parametros de ganancia a Tiempo*. [Online]. Available: <http://digital.ni.com/>



**Nombre del curso:** Control de procesos

**Guía No.** G-IE-LCPA-01

**Semestre:** X

**Laboratorio:** Procesos y Automatización

**Ubicación:** Sede Laboratorios Ingenierías – Carrera 3 No 2 -60

**Área de formación:** Ciencias básicas de la Ingeniería

**Duración:** 1 hora 30 minutos

**Nombre de la práctica:** Configuración y calibración del sensor termistor.

## GUÍA DE TRABAJO PARA EL CURSO DE CONTROL DE PROCESOS

### INTRODUCCIÓN

La imprecisión de la medición de los sensores en un proceso productivo, ocasiona que la composición del producto final se vea afectada, en consecuencia es importante que los dispositivos de medición siempre estén bien calibrados.

Este documento tiene como objetivo presentar al estudiante una guía formal para configurar y calibrar el sensor termistor de la planta de temperatura Amatrol T5553 empleando la metodología TOP-DOWN.

### OBJETIVO GENERAL

Fortalecer los conocimientos del estudiante en lo que refiere a la calibración del sensor industrial termistor.

### CONSULTAS PRELIMINARES

Tener un conocimiento previo de circuitos básicos de uso general en electrónica

Estar cursando la asignatura de control de procesos con el objetivo de manejar con claridad cualquier CI de mediana complejidad.

Utilizar eficaz y responsablemente el tiempo programado para COMPLEMENTAR y EJECUTAR las prácticas propuestas para el laboratorio, disponiendo semanalmente de horarios diferentes al horario presencial programado.

### EQUIPOS Y MATERIALES

- Cable de extensión del termistor
- Cable de comunicación INOR
- 1 cable de conexión rojo

- 1 cable de conexión negro

### PROCEDIMIENTO

A continuación se describe los pasos para calibrar el sensor termistor de la planta de temperatura Amatrol T5553. [1]

1. Conectar el cable de extensión del termistor al panel del transmisor, es blanco y tiene un conector de tres puntas en cada extremo. La punta terminal negativa es más ancha. Ésta configuración también asegura que el conector encaje de forma correcta.  
Por otra parte se debe alimentar el panel del transmisor con 24VDC y por ultimo establecer la comunicación serial por medio del cable INOR entre la planta y el computador que tiene el software IPRO. En la figura 1 se enseñan las conexiones que se deben realizar.

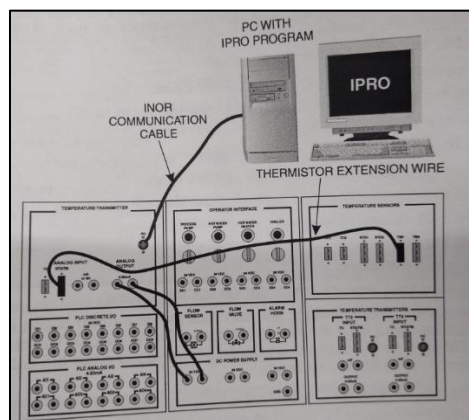


Figura 1: Conexiones en campo

2. Asegúrese de que el termostato (JC 1100) se encuentre ajustado en un valor de 60 °C (140 ° F).
3. Con la ayuda del laboratorista retire el candado de seguridad de la planta y enciéndala.
4. Asegúrese de que el selector "HOT WATER EATER" se encuentre en la posición de ENCENDIDO para permitir que el calentador continúe calentando.
5. Si el software IPRO no se está ejecutando, inicie el software IPRO.

Cuando el software ya está abierto, se debe en primer lugar seleccionar la pestaña "**Trasmisor**" y en la lista desplegable escoger el trasmisor "**IPAQ-Lplus**".

En segundo lugar se selecciona la pestaña "**Entrada**" en la ventana de configuración. Esto permite configurar el transmisor para el tipo de entrada, en este caso es la resistencia de un termistor NTC.

- a. Seleccione la resistencia en el menú desplegable del campo "**Tipo de entrada**". Usted podrá especificar el rango de resistencia más adelante.
- b. Haga clic en el campo "**Entrada mínima (°C)**" y escriba 187. Esto establece la resistencia mínima como 187 ohmios.
- c. Deje el campo "**Error de sensor (+/- °C)**" ubicado debajo de la entrada mínima ajustado a cero. No se requiere corrección de errores.



- d. Haga clic en el campo "**Entrada Máxima (°C)**" y escriba 1991. Esto establece la máxima resistencia como 1991 Ohm.
- e. Deje el campo "**Error de sensor (+/- °C)**" ubicado debajo de la entrada máxima ajustado a cero. No se requiere corrección de errores.
- f. Deje el campo "**Filtro (s)**" establecido en cero. No se requieren filtros.
- g. Asegúrese de que el campo "**Linearización**" esté configurado como Cliente. Si no es así, puede hacer clic en el botón desplegable en el campo de linealización y seleccionarlo en el menú desplegable. Hay solamente dos opciones, "Cliente" y "Resistencia". Seleccionando "Cliente" le permite introducir los pares de datos para linealizar la temperatura a la resistencia.
- h. Seleccione 3 hilos en el menú desplegable de "**Conexión**". El termistor del T5553-BE está conectado en la configuración de 3 hilos.
- i. Seleccione ° F o ° C en el menú desplegable donde aparece el campo de "**Unidad de ingeniería**". Esto selecciona las unidades de medición de temperatura.
- j. Escriba -170 (si usa ° F) o -76.7 (si está usando ° C) en el campo "**Mínima, unidades de Ingeniería**". Esto establece la temperatura mínima. Se introduce como un número negativo porque el termistor es un termistor NTC.
- k. Escriba -50 (si se utiliza ° F) o -10 (si se utiliza ° C) en el campo "**Máxima, unidades de ingeniería**". Establece la temperatura máxima. A pesar de que es un número negativo, sigue siendo superior a la configuración mínima.
- l. Deje el campo "**Rotura de sensor**" ajustado en Max (> 21 mA), que es el ajuste predeterminado.

Los ajustes de la pestaña de entrada deben mostrarse como se muestra en la figura 2 usando ° F o como se muestra en la figura 3 si se usa ° C. Si no, haga los cambios requeridos.




Figura 2: Configuración de la resistencia del termistor si se quiere configurar en grados fahrenheit

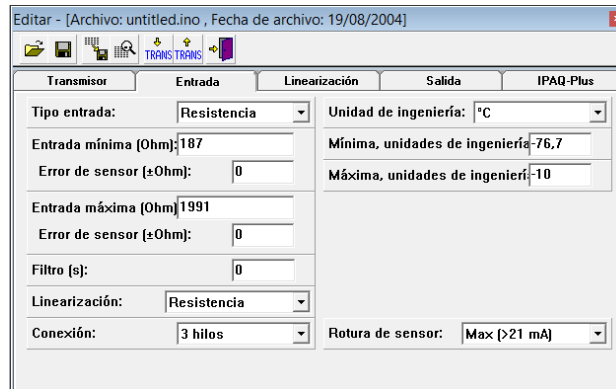


Figura 3: Configuración de la resistencia del termistor si se quiere configurar en grados centígrados

En tercer lugar para establecer los datos de linealización del termistor, se selecciona la pestaña **“linealización”**, es importante mencionar que si se está utilizando °F la interfaz se debe mostrar como se ve en la figura 4, o si está utilizando °C como se ve en la figura 5.

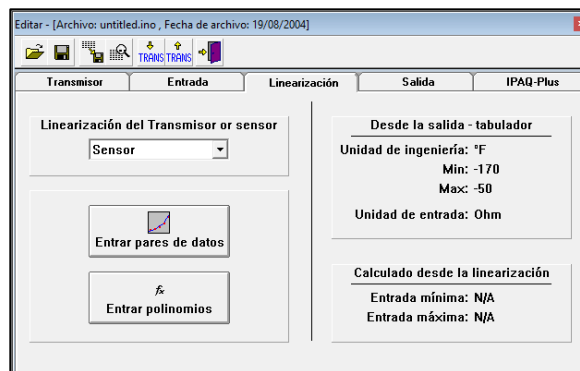


Figura 4: Configuración de linealización si se está utilizando grados fahrenheit

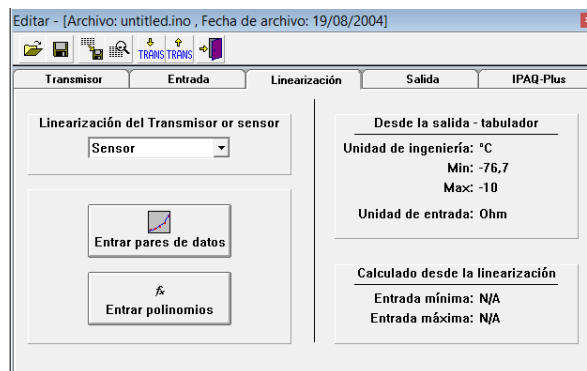


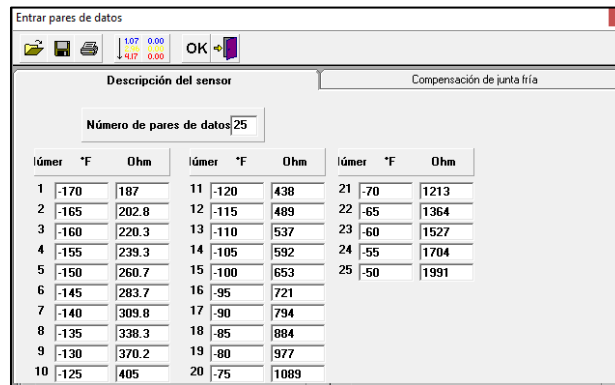
Figura 5: Configuración de linealización si se está utilizando grados centígrados.

Acto seguido, se deben realizar los siguientes pasos.

- a. Seleccione **“Sensor”** del campo de **“linealización de Trasmisor o sensor”**
- b. Haga clic en el botón **“Entrar pares de datos”** para introducir los pares de datos.

- c. Cambie el valor en el campo "Número de pares de datos" a 25 y presione la tecla enter.
- d. Introduzca los datos en la tabla como se muestra en la figura 6 si se usa ° F o como se muestra en la figura 7 si se usa ° C, cuando finalice de ingresar los datos presione el botón "OK".

Nota: Las temperaturas se introducen con valores negativos porque el software IPRO requiere que los pares de temperatura y resistencia estén en orden creciente.



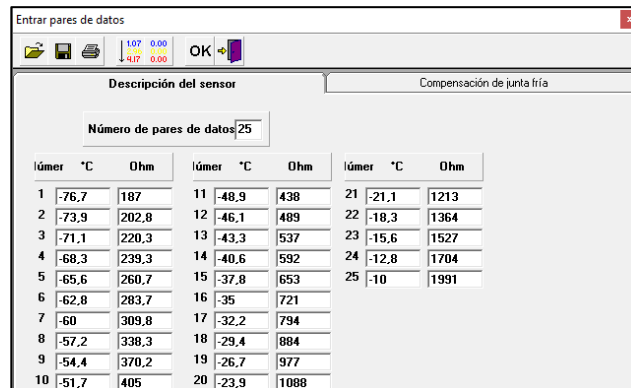
Entrar pares de datos

Descripción del sensor

Número de pares de datos: 25

lúmer	*F	Ohm	lúmer	*F	Ohm	lúmer	*F	Ohm
1	-170	187	11	-120	438	21	-70	1213
2	-165	202.8	12	-115	489	22	-65	1364
3	-160	220.3	13	-110	537	23	-60	1527
4	-155	239.3	14	-105	592	24	-55	1704
5	-150	260.7	15	-100	653	25	-50	1991
6	-145	283.7	16	-95	721			
7	-140	309.8	17	-90	794			
8	-135	338.3	18	-85	884			
9	-130	370.2	19	-80	977			
10	-125	405	20	-75	1089			

Figura 6: pares de datos si se utiliza grados fahrenheit.



Entrar pares de datos

Descripción del sensor

Número de pares de datos: 25

lúmer	*C	Ohm	lúmer	*C	Ohm	lúmer	*C	Ohm
1	-76,7	187	11	-48,9	438	21	-21,1	1213
2	-73,9	202,8	12	-46,1	489	22	-18,3	1364
3	-71,1	220,3	13	-43,3	537	23	-15,6	1527
4	-68,3	239,3	14	-40,6	592	24	-12,8	1704
5	-65,6	260,7	15	-37,8	653	25	-10	1991
6	-62,8	283,7	16	-35	721			
7	-60	309,8	17	-32,2	794			
8	-57,2	338,3	18	-29,4	884			
9	-54,4	370,2	19	-26,7	977			
10	-51,7	405	20	-23,9	1088			

Figura 7: Pares de datos si se utiliza grados centígrados.

En cuarto lugar, se debe seleccionar la pestaña "Salida" y se debe realizar los ajustes que se muestran en la figura 8.

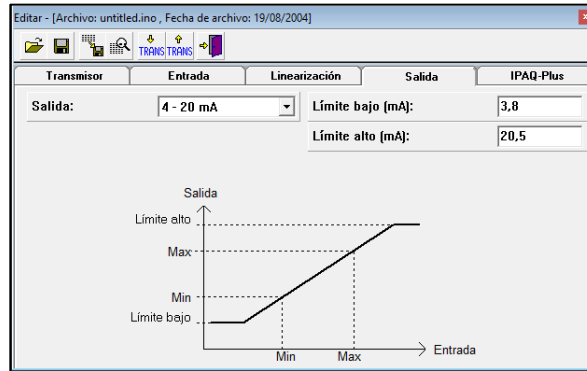


Figura 8: Ajustes de salida

En quinto lugar, seleccione la pestaña "IPAQ-Plus" y configure las opciones de pantalla como se muestra en la figura 9 para ° F o la figura 10 para ° C.

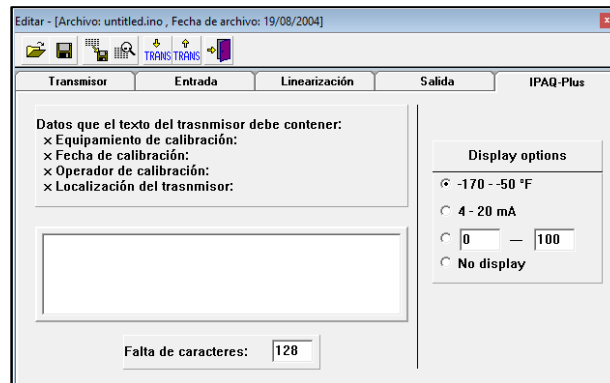


Figura 9: Configuración IPAQ PLUS si se utiliza grados fahrenheit

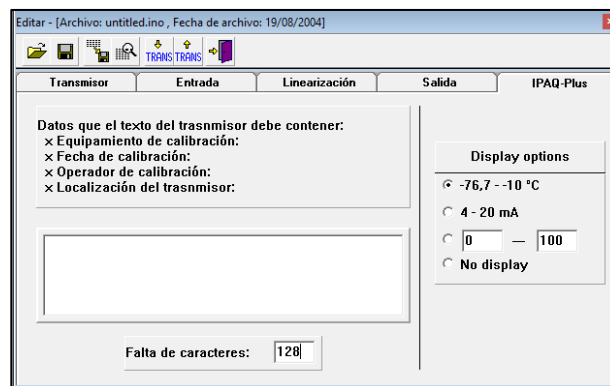


Figura 10: Configuración IPAQ PLUS si se utiliza grados centígrados

Enseguida, realice los siguientes pasos para transferir los datos de configuración al transmisor.

- Asegúrese de que el cable de comunicación se encuentre conectado del PC al panel del transmisor.
- Haga clic en el botón "TRANS (flecha abajo)" para transferir al transmisor la información.

- c. Haga clic en "Sí" para guardar la configuración. Aparece otro mensaje preguntando si desea escribir sobre el archivo existente almacenado actualmente en el transmisor.
- d. Haga clic en "Sí" para escribir sobre el archivo existente. Aparecerá el mensaje de confirmación de la transferencia de configuración pidiéndole que confirme la transferencia de la configuración.
- e. Haga clic en "Sí" para iniciar la transferencia. Aparece un indicador de estado que indica el progreso de la transferencia. Cuando se complete la transferencia, aparecerá otro mensaje indicando que el transmisor ha recibido los nuevos datos.
- f. Haga clic en "Aceptar" en el cuadro de solicitud para cerrarlo. El transmisor está ahora configurado para el termistor. El indicador digital debe ser escalado para mostrar correctamente la temperatura.

Por último, lleve a cabo los siguientes pasos para probar el funcionamiento del transmisor de temperatura, y para utilizar la función de "visualización del medidor" de visor del software de configuración IPRO.

- a. Haga clic en el botón "**Ver medida**" en la barra de botones en la parte superior de la pantalla principal, similar a la figura 11.

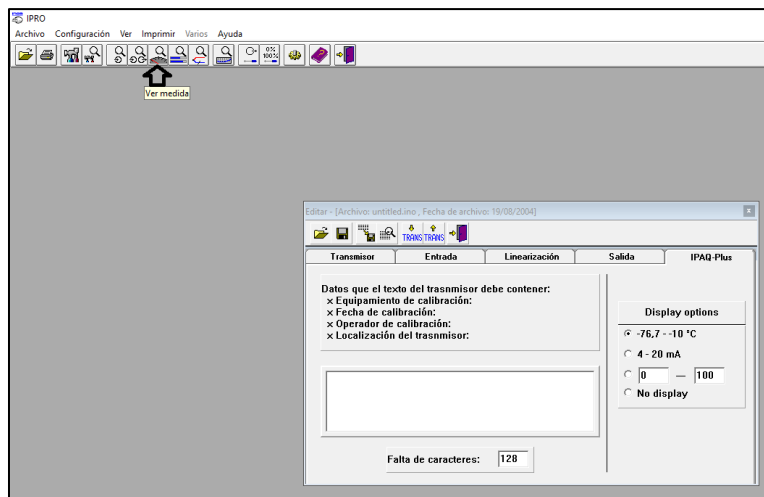


Figura 11. Menú vista del indicador

Esto hace que aparezca la ventana del indicador visual, similar a la figura 12. La pantalla mostrará °C o °F, dependiendo de lo seleccionado anteriormente. El indicador de la izquierda, indica la temperatura de entrada medida. El indicador de la derecha, indica la corriente de salida del transmisor. El software recibe datos del transmisor a través del cable de comunicación.

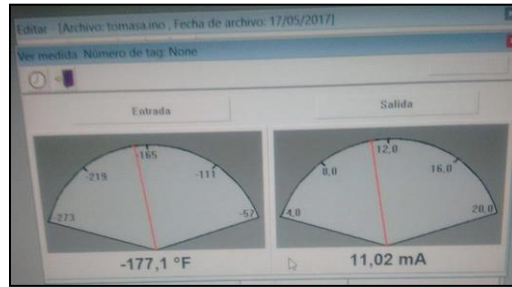


Figura 12: Indicador

- b. Asegúrese de que el indicador de temperatura en el tanque de agua caliente (TI 800C) lea aproximadamente 140 ° F o 60 ° C. Si no es así, asegúrese de que el selector del calentador de agua caliente "HOT WATER EATER" esté encendido y el termostato esté ajustado a 60 ° C (140° F)
- c. Cuando la temperatura del agua caliente alcance 140 ° F (60 ° C), encienda el selector de la bomba del lazo de servicio "HOT WATER PUMP" para que comience a circular el agua caliente.
- d. Encienda la bomba del proceso "PROCESS PUMP" para que inicie el flujo a través del lazo principal.
- e. Observe el indicador de temperatura y el indicador de corriente de salida, debe notar que el indicador de temperatura indica un aumento de la temperatura. Además, la corriente de salida mide un aumento en la corriente de salida, debido al aumento de temperatura.
- f. Observe el indicador de temperatura en la pantalla y el sensor de terminal fijo ubicado a la salida del intercambiador de calor (TI 600B). La temperatura en esta pantalla debe estar entre + -2 ° C o + -4 ° F en comparación con el sensor.
- g. Apague la bomba del proceso "PROCESS PUMP", la bomba del lazo de servicio "HOT WATER PUMP" y el calentador "HOT WATER EATER".
- h. Apague la planta.
- i. Realice las desconexiones pertinentes.
- j. Cierre el software y apague el computador.
- k. Finalmente realice la entrega de los elementos al laboratorista

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Amatrol, "Temperature transmitter and thermistor test," in *Installation guide for T5553-BE thermal process control learning system*, 2013, pp. 77–87.

## RECOMENDACIONES

Respetar las políticas y reglamento de laboratorios.

Utilizar los elementos de protección individual en caso de ser necesario.

Solicitar los elementos o equipos de laboratorio a tiempo, según lo establece el reglamento.



CONTROL DE EMISIÓN		
Elaboró	Revisó	Autorizó
Juan José Muñoz Lina Marcela Lara <i>Estudiantes</i>	Jaime Francisco España <i>Laboratorista</i>	Carlos Mario Belalcazar <i>Director de laboratorios</i>
Firma	Firma	Firma
Fecha: Agosto 2018	Fecha: Agosto 2018	Fecha: Agosto 2018



**Nombre del curso:** Control de procesos

**Guía No.** G-IE-LCPA-02

**Semestre:** X

**Laboratorio:** Procesos y Automatización

**Ubicación:** Sede Laboratorios Ingenierías – Carrera 3 No 2 -60

**Área de formación:** Ciencias básicas de la Ingeniería

**Duración:** 6-8 horas

**Nombre de la práctica:** Adquisición de la curva de reacción de la planta de temperatura Amatrol T5553 del laboratorio de procesos

## GUÍA DE TRABAJO PARA EL CURSO DE CONTROL DE PROCESOS

### INTRODUCCIÓN

Muchos de los métodos actuales de identificación de procesos, se basan en definir el modelo de la planta (Función de transferencia) a partir de la curva de reacción, ya que obtener el comportamiento dinámico de un sistema por medio de ecuaciones matemáticas muchas veces es tedioso.

Este documento tiene como objetivo presentar al estudiante una guía formal para adquirir la curva de reacción de la planta de temperatura Amatrol T5553 empleando la metodología TOP-DOWN.

### OBJETIVO GENERAL

Fortalecer los conocimientos del estudiante en el área de identificación de procesos.

### CONSULTAS PRELIMINARES

Tener un conocimiento previo de circuitos básicos de uso general en electrónica

Estar cursando la asignatura de control de procesos con el objetivo de manejar con claridad cualquier CI de mediana complejidad.

Utilizar eficaz y responsablemente el tiempo programado para COMPLEMENTAR y EJECUTAR las prácticas propuestas para el laboratorio, disponiendo semanalmente de horarios diferentes al horario presencial programado.

### TEORIA PRELIMINAR

#### 1. Identificación del modelo por medio de la curva de reacción

Existen varios métodos que se pueden utilizar para identificar el modelo de un proceso a partir de la curva de reacción, a continuación se describen los más utilizados en la industria. [1]



- 1.1. Método de la tangente (Miller, Ziegler y Nichols)
- 1.2. Método de dos puntos (Alfaro, Broida, Chen y Yan, Ho, Smith, Viteckova)
- 1.3. Método de tres puntos (Jahanmiri y Fallanhi, Stark)

Dependiendo el comportamiento de la curva de reacción, los modelos pueden ser:

*Primer orden más tiempo muerto*

$$G_p(s) = \frac{K_p e^{-ms}}{\tau S + 1} \quad (1)$$

*Segundo orden sobreamortiguado más tiempo muerto*

$$G_p(s) = \frac{K_p e^{-ms}}{(\tau_1 S + 1) + (\tau_2 S + 1)} \quad (2)$$

*Segundo orden subamortiguado más tiempo muerto*

$$G_p(s) = \frac{K_p e^{-ms}}{\tau^2 S^2 + 2\zeta\tau S + 1} \quad (3)$$

Por otro lado en todos los métodos, la ganancia es el cambio total en la salida dividido por el cambio en la entrada

$$Kp = \frac{\Delta y}{\Delta u} \quad (4)$$

Hay que mencionar que se va a describir los métodos 1.1 y 1.2.

Se debe agregar que la curva de reacción del proceso se obtiene mediante una prueba de lazo abierto con el controlador en modo manual (desconectado de la prueba), y el sistema en estado estable. En estas condiciones se aplica un cambio de escalón en la salida del controlador y se registra esta señal y la de salida del proceso, desde el instante en que se aplicó el escalón de entrada hasta que el sistema alcance un nuevo punto de operación estable. [1]

En la figura 1, se enseña una prueba de lazo abierto en una estructura de control.

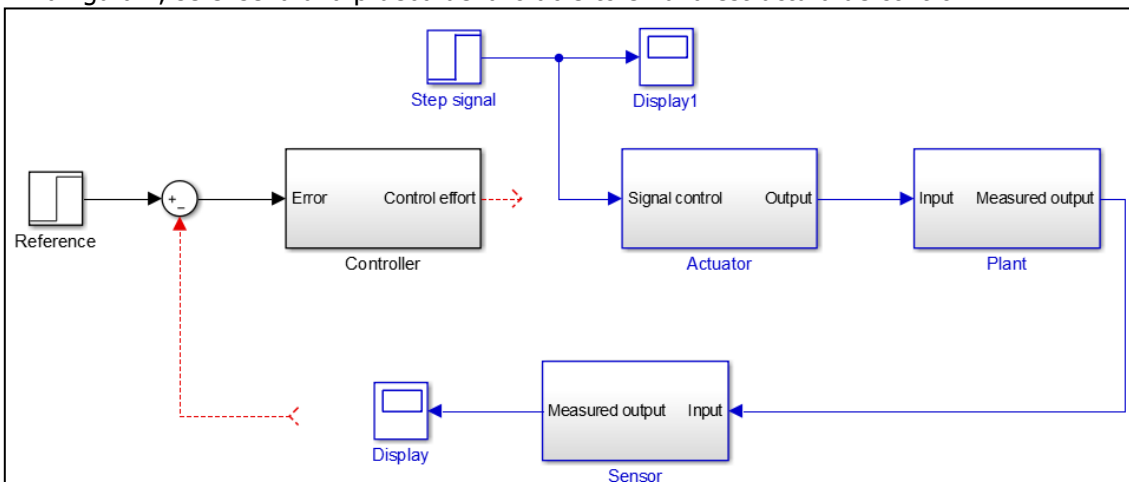


Figura 1: Prueba de lazo abierto diseñada en Simulink de MATLAB. Fuente: Autores

### 1.1. Método de la tangente de Ziegler y nichols

Fue el primer método de identificación propuesto para la sintonización de un controlador. El procedimiento requiere que se trace una recta tangente a la curva de reacción del proceso en su punto de inflexión o de máxima pendiente, como se muestra en la figura 2. [1]

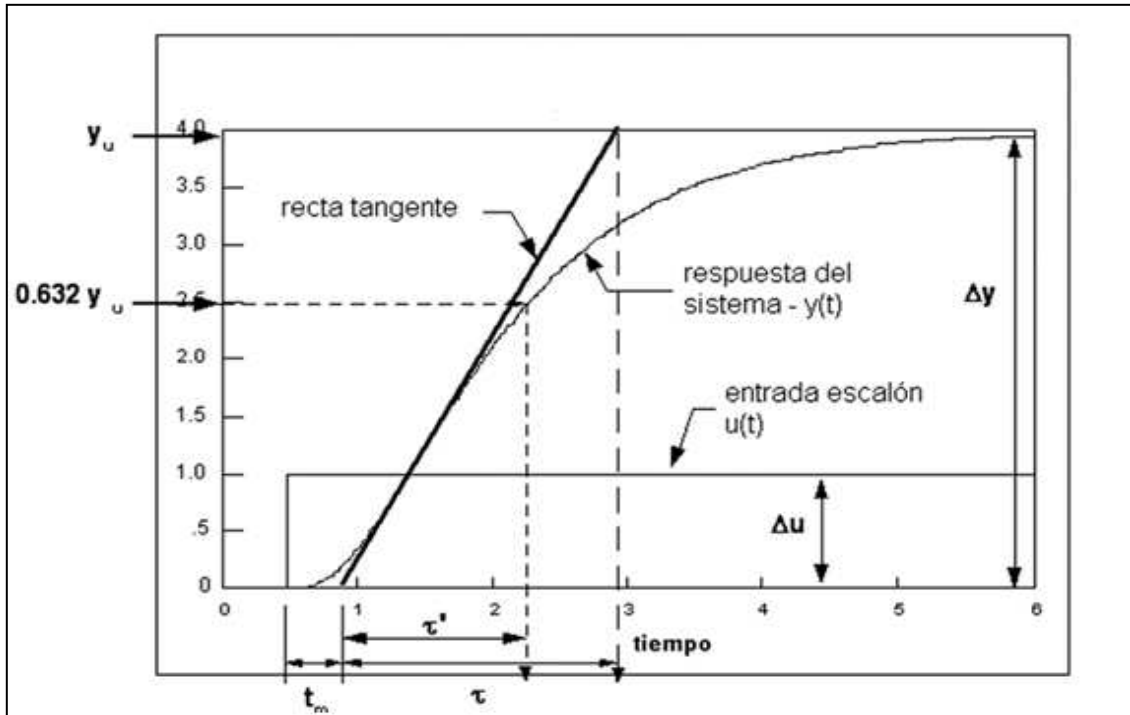


Figura 2: Método de la tangente de Ziegler y Nichols. Fuente: [1]

### 1.2. Método de dos puntos (Alfaro, Broida, Chen y Yan, Ho, Smith, Viteckova)

El método anterior requiere que se trace una línea tangente en el punto de inflexión de la curva, Ahora bien, teniendo en cuenta que la recta no siempre es fácil de trazar porque algunos sistemas presentan ruido, se puede considerar que este método no es viable para todo tipo de sistema porque una variación en la pendiente de la recta tangente afecta tanto el valor del tiempo muerto como el de la constante de tiempo del modelo.

Para identificar los parámetros que requiere el modelo, la constante de tiempo ( $\tau$ ) y el tiempo muerto ( $t_m$ ) en el método de dos puntos, se establecen dos ecuaciones con dos incógnitas utilizando dos puntos sobre la curva de reacción. De esta manera se garantiza que la respuesta del modelo coincida con la del sistema real en estos dos puntos como mínimo. [1]

#### 1.2.1. Método de Smith

El primer método basado en dos puntos sobre la curva de reacción fue propuesto por Smith. Los instantes seleccionados por este autor fueron tiempos requeridos para que la respuesta alcance el 28.3% ( $t_{28}$ ) y el 63.2% ( $t_{63}$ ) del valor final y corresponden a: [1]



de Alfaro, Broida, Chen, Hot et al, Smith y Viteckova et al, se resumen en la tabla 1.

<i>Método</i>	$\%P_1 (t_1)$	$\%P_2 (t_2)$	<i>A</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
<b>Alfaro</b>	250	75.0	-0.910	0.910	1.262	-0.262
<b>Bröida</b>	28,0	40.0	-5.500	5.500	2.800	-1.800
<b>Chen y Yang</b>	33,0	67.0	-1.400	1.400	1.540	-0.540
<b>Ho et al.</b>	35.0	85.0	-0.670	0.670	1.300	-0.290
<b>Smith</b>	28.3	63.2	-1.500	1.500	1.500	-0.500
<b>Vitecková et al.</b>	33.0	70.0	-1.245	1.245	1.498	-0.498

*Tabla 1: Constantes para la identificación de los modelos de primer orden más tiempo muerto.*  
 Fuente [1]

## EQUIPOS Y MATERIALES

- Cable de extensión del termistor
- 4 cables de conexión rojos
- 3 cables de conexión negros
- Cable de conexión USB USB
- Memoria USB, que contiene los archivos de ejecución.

## PROCEDIMIENTO

En relación a la estructura básica de la planta de temperatura amatrol T5553, es importante decir que este sistema cuenta con tres circuitos (o lazos), que se encargan de hacer circular un fluido con la finalidad de realizar cambios a la temperatura del proceso, estos circuitos se identifican de la siguiente forma:

- **Lazo principal o de proceso** (Línea Verde, Figura 4); este se encarga de hacer circular el fluido al cual se le aplicaran cambios térmicos.
- **Lazo de servicio** (Línea Roja, Figura 4); A través de este lazo circula el agua caliente que se encarga de calentar el agua del proceso, a través del intercambiador de calor que lo une con el lazo principal.
- **Lazo de enfriamiento** (Línea Azul, Figura 4); Este lazo se compone de un enfriador el cual impulsa un gas (Freon "CFC") con la finalidad de enfriar el flujo del lazo principal.

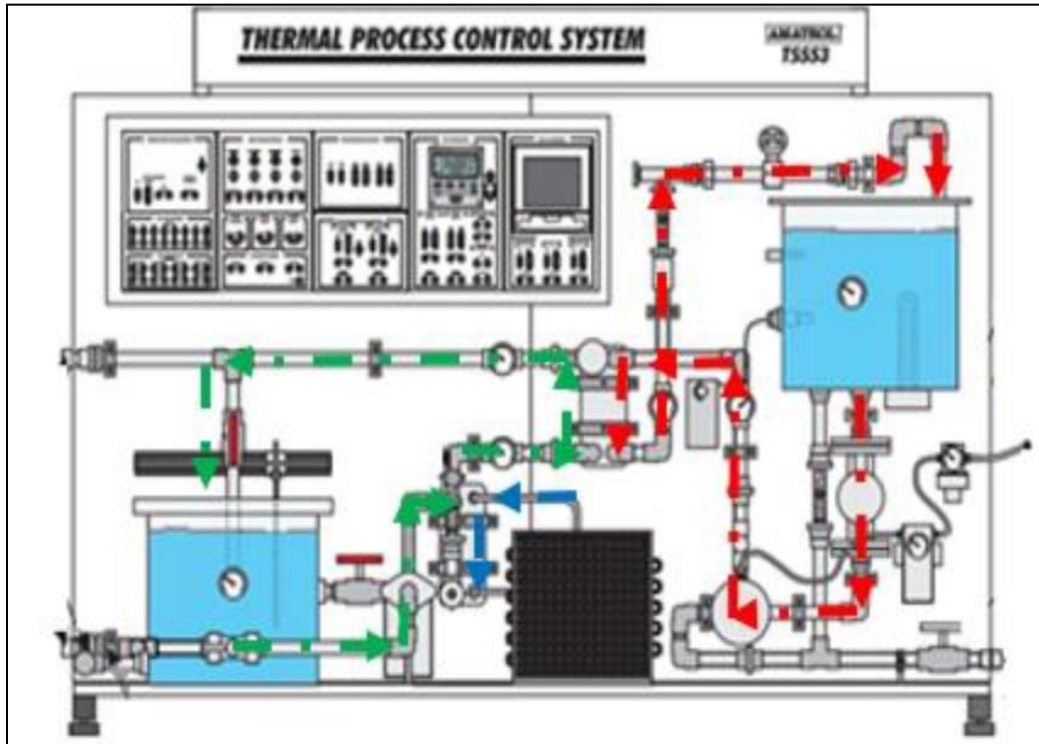


Figura 4: Estructura de la planta T5553 del laboratorio de procesos. Fuente: [2]

Inicialmente, para obtener la curva de reacción de la planta de temperatura, es necesario realizar las siguientes configuraciones en campo:

1. Verifique que la bomba del proceso (PROCESS PUMP), el enfriador (CHILLER), la bomba de agua caliente (HOT WATER PUMP) y el calentador (HOT WATER HEATER) se encuentren apagados, como se indica en la fotografía 1.



Fotografía 1: Interfaz de operador

2. Acerca del instrumento PC1000, se debe conectar al suministro de aire, como se indica en la fotografía 2:



Fotografía 2: Conexión del suministro de aire.

3. Por otro lado se debe encender el compresor, desde el panel de switch como se indica en la fotografía 3.



Fotografía 3: Switch del compresor.

4. Hay que mencionar que el valor del instrumento P11000A, debe indicar 20 PSI, como se muestra en la fotografía 4.



Fotografía 4: Valor en PSI que debe estar el P1 1000A.

Nota: Si el valor del P1 1000A, no se encuentra en 20 PSI, se debe desplazar la perilla que se encuentra en la base del instrumento hacia abajo y girarla hasta que la medición sea correcta, acto seguido, se desplaza la perilla hasta su posición inicial.

5. En campo asegúrese que las siguientes válvulas se encuentren cerradas
  - HV 500B, HV 500D, HV 700
6. En campo asegúrese que las siguientes válvulas se encuentren abiertas

- HV 500A, HV500C
- 7. Se debe verificar el nivel de los tanques
- TK1: Mínimo  $\frac{3}{4}$  de la capacidad máxima
- TK2: sobrepasar el instrumento LS900

Ya realizada la configuración en campo, se deben realizar los siguientes pasos:

1. Realizar las conexiones de la figura 5

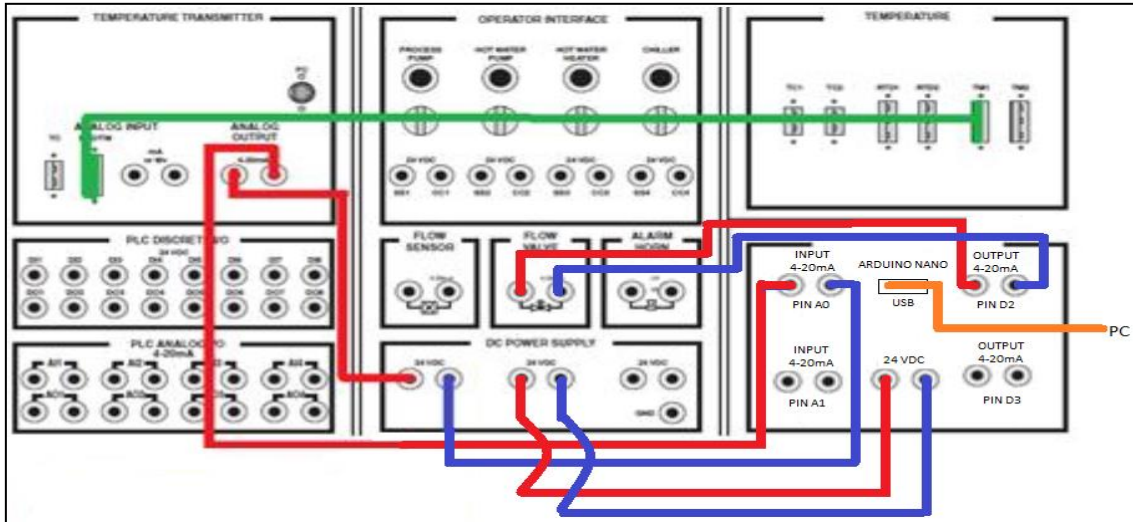


Figura 5: Conexiones necesarias para la prueba.

1. Con la ayuda del laboratorista, quitar el candado de seguridad de la planta, verificar que la planta se encuentre conectada a la red eléctrica y encenderla.
2. Encender el calentador del tanque del lazo de servicio (HOT WATER EATER) , como se indica en la fotografía 5.



Fotografía 5: Calentador del tanque de servicio en estado encendido

3. Graduar la temperatura del tanque del lazo del servicio desde el termostato (JC 1100) a 130°F, como se muestra en la fotografía 6.



*Fotografía 6: Termostato graduado a 130°F*

4. Se espera a que la temperatura en el tanque del lazo de servicio (TK2) sea aproximadamente 55 C°, como se enseña en la fotografía 7.



*Fotografía 7: Indicador de temperatura del tanque de servicio*

2. Se enciende la bomba del lazo principal (PROCESS PUMP) y el enfriador (CHILLER), en consecuencia la interfaz de operador (OPERATOR INTERFACE) debe mirarse como se indica en la fotografía 8.





Fotografía 8: Interfaz de operador

5. Dirigirse a los archivos de la memoria USB, abrir la carpeta principal "EscenarioControlPlantaTemperatura", luego abrir la carpeta "Curva de reacción", acto seguido se abre la carpeta "Cr" que contiene un código en Arduino. Ese código se debe quemar a la tarjeta Arduino Mega.
6. Ejecutar MATLAB.
7. Dirigirse a los archivos de la memoria USB, abrir la carpeta "EscenarioControlPlantaTemperatura", luego abrir la carpeta "Curva de reacción", llegados a este punto se copia la ubicación de los archivos como se indica en la figura 6.

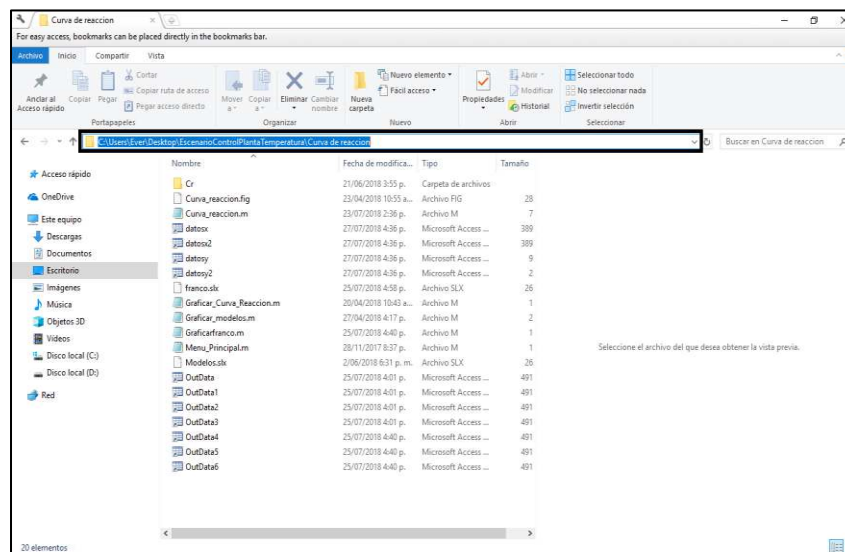


Figura 6: Ubicación en Windows de los archivos necesarios para ejecutar la prueba.

8. El recuadro negro de la figura 7 indica el lugar donde se debe pegar la dirección copiada, luego presionar la tecla "Enter", por otra parte el recuadro rojo de la misma figura debe mostrar los archivos de la carpeta "Curva de reacción".

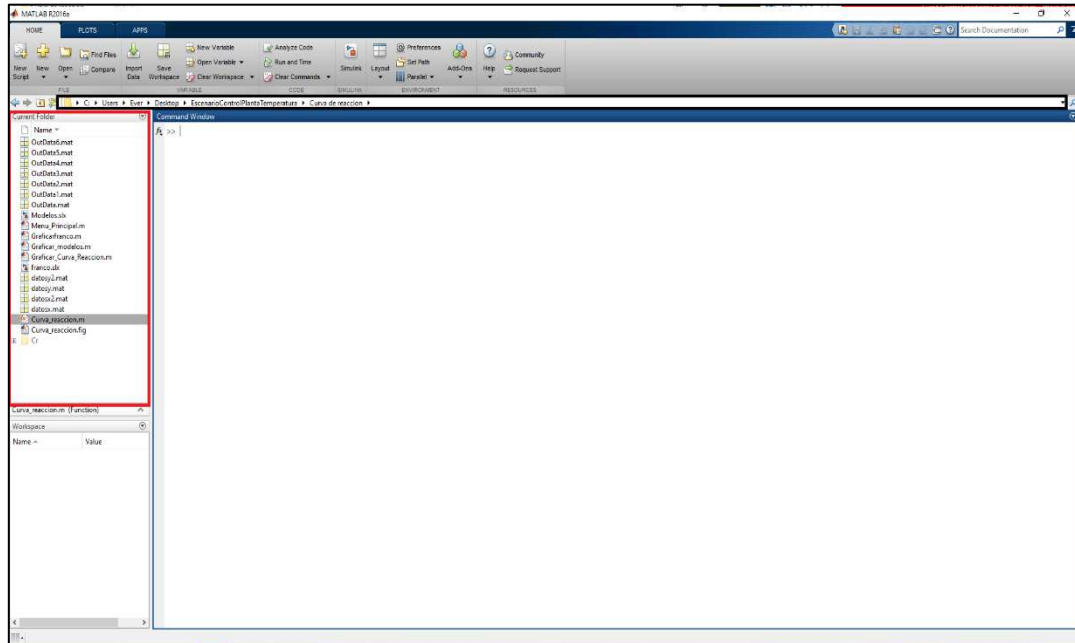


Figura 7: Espacio de trabajo de MATLAB

9. Se abren los script "Curva\_reaccion.m", "Graficar\_Curva\_Reaccion.m" y "Menu\_Principal.m".
10. En el script "Curva\_reaccion.m" se busca la línea 56 y se cambia el número del COM al que designo el computador, y se da guardar.
11. Se compila el archivo denominado "Menú\_Principal", se espera un momento y debe aparecer la siguiente interfaz de usuario:

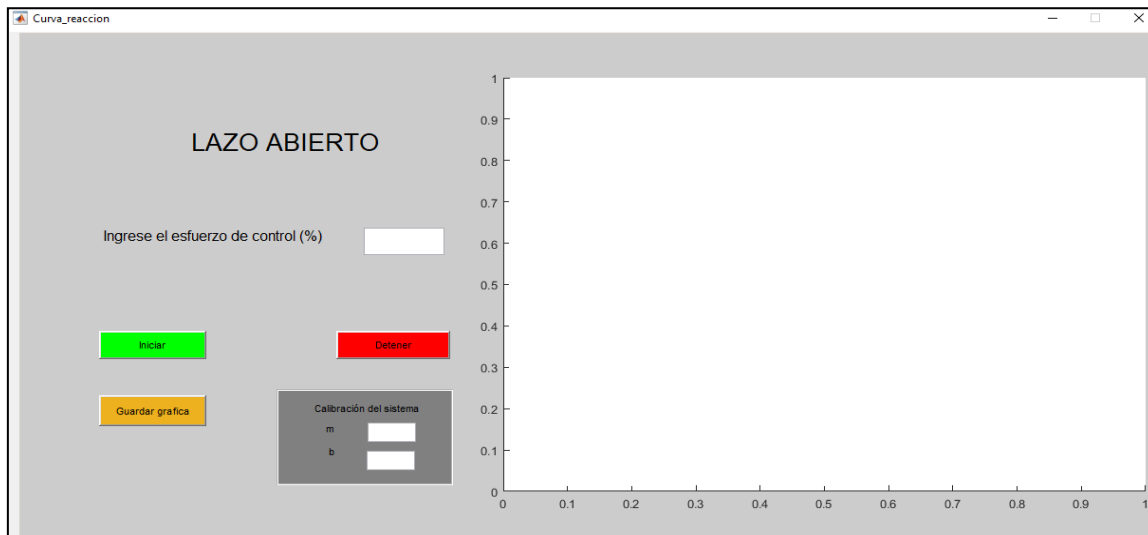


Figura 8: Escenario para prueba de lazo abierto.

12. En la interfaz de usuario, en el espacio contiguo a "Ingrese el esfuerzo de control (%)" digite un valor de 0 a 100 y presione la tecla "Enter", el valor de 0 a 100 significa el porcentaje de apertura de la válvula de control, se recomienda que el valor inicial sea 70, para que haya poco paso de flujo al intercambiador de calor.
13. Se enciende la bomba del lazo de servicio (HOT WATER PUMP), en consecuencia la interfaz de operador (OPERATOR INTERFACE) debe mirarse como se indica en la fotografía 9.



Fotografía 9: Interfaz de operador

14. Se debe presionar el botón de "Iniciar" y los datos deben aparecer graficados como se enseña en la figura 9.

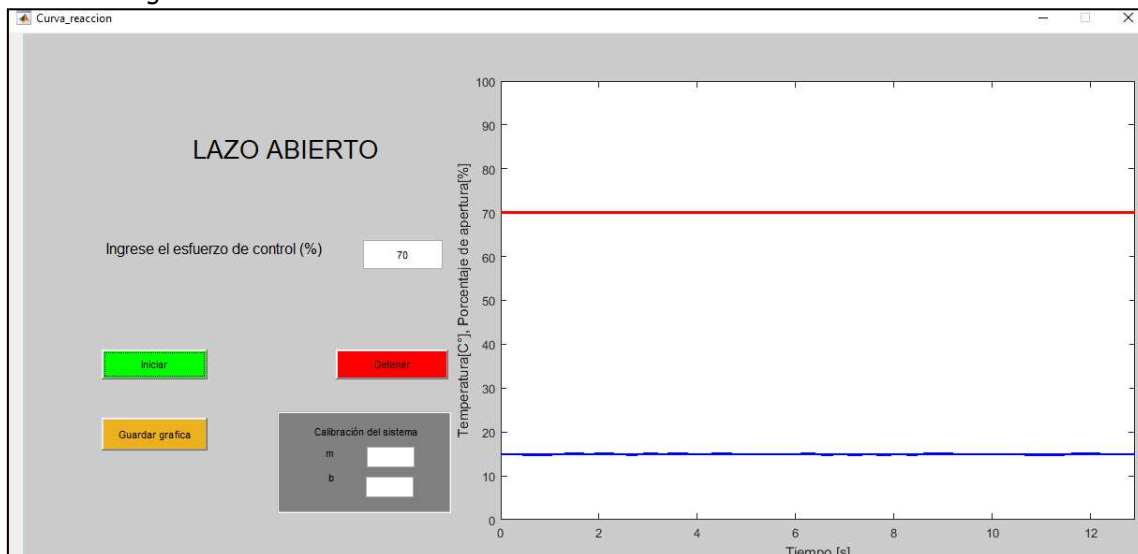


Figura 9: Adquisición de datos en la interfaz de usuario

Nota: Si en la interfaz de usuario los datos de la variable del proceso (Linea azul) que se están

obteniendo no corresponden a los sentidos por el espiral de terminación fija (TI 600C), del tanque del proceso (TK1) sírvase ver el anexo de esta guía.

15. Se debe esperar hasta que la variable del proceso se estabilice, este proceso puede demorar de 3 a 5 horas.
16. Cuando la temperatura del tanque principal se encuentre estabilizada se aplica el cambio en la variable manipulada, que consiste en cambiar el porcentaje del esfuerzo de control en la interfaz de usuario, se recomienda cambiar a 30%.
17. Nuevamente se espera hasta que la temperatura del proceso vuelva a estabilizarse. En la figura 10, se enseña la curva de reacción de la planta de temperatura.

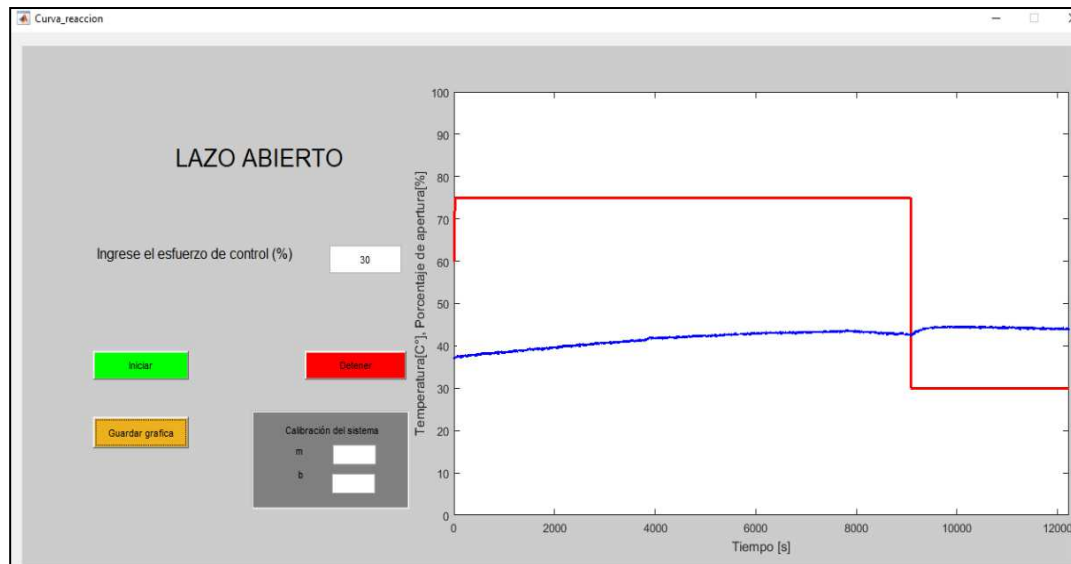


Figura 10: Curva de reacción de la planta de temperatura Amatrol T5553.

18. Cuando se requiera finalizar la práctica se presiona el botón "Detener" y luego se presiona el botón "Guardar grafica", se cierra el escenario de control.
19. Se dirige al espacio de trabajo de MATLAB y se compila el script "Graficar\_curva\_reaccion" previamente abierto, y debe aparecer la gráfica obtenida como se enseña en la figura 11.

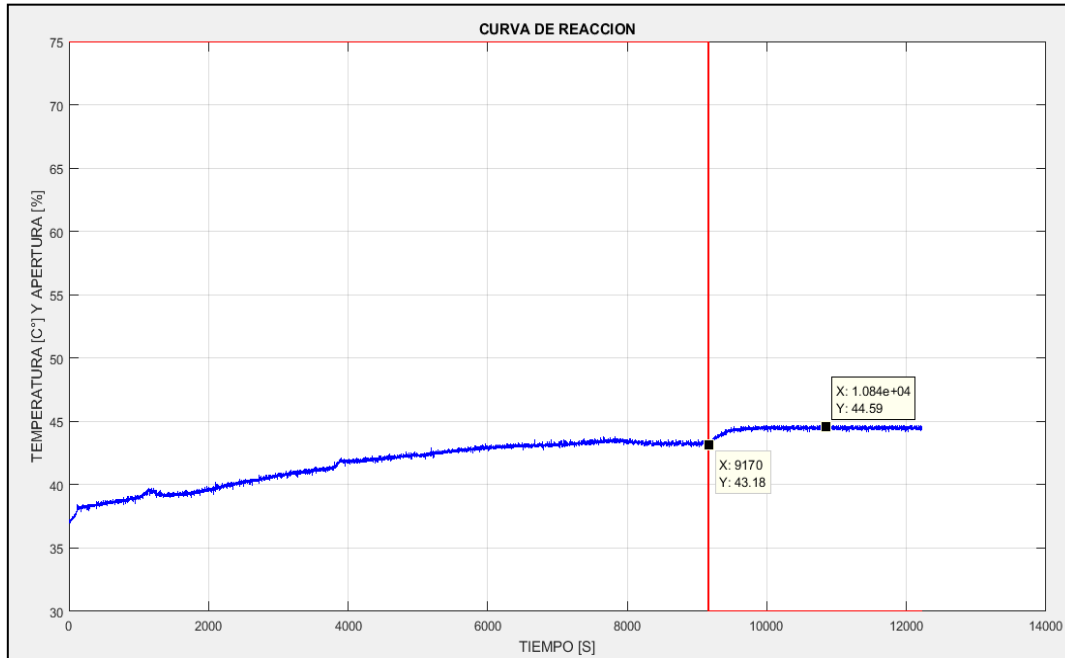


Figura 11: Curva de reacción gráfica desde el script "Graficar curva reacción"

20. Si se desea se puede guardar la grafica obtenida
3. Finalmente cierre MATLAB, apague la planta, realice las desconexiones a las que haya lugar y entregue los elementos al laboratorista.

Nota: Cada vez que se requiera graficar la curva obtenida se compila el script "Graficar\_Curva\_Reaccion", y la gráfica aparecerá ya que los vectores se encuentran almacenados en la carpeta "Curva\_reaccion", sin embargo es importante mencionar que si se vuelve a ejecutar la interfaz para obtener nuevos resultados, los vectores se pierden, pero si se han copiado a otra carpeta de seguridad no habrá problema.

## RECOMENDACIONES

Respetar las políticas y reglamento de laboratorios.  
 Utilizar los elementos de protección individual en caso de ser necesario.  
 Solicitar los elementos o equipos de laboratorio a tiempo, según lo establece el reglamento.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. M. Alfaro, *Sobreamortiguados Utilizando*, vol. 11. .
- [2] Alves de Oliveira Juraci, "Guías de Laboratorio," *Práctica 1*, p. 4, 2014.



CONTROL DE EMISIÓN		
Elaboró	Revisó	Autorizó
Juan José Muñoz Lina Marcela Lara <i>Estudiantes</i>	Jaime Francisco España <i>Laboratorista</i>	Carlos Mario Belalcazar <i>Director de laboratorios</i>
Firma	Firma	Firma
Fecha: Agosto 2018	Fecha: Agosto 2018	Fecha: Agosto 2018

## ANEXO DE LA GUIA G-IE-LCPA-02

### Escalización de la medición del sensor

En primer lugar, es necesario resaltar que el sensor que se escogió para el lazo de control fue el termistor, en consecuencia el primer paso que se realizó fue registrar los valores de salida de corriente del sensor y la lectura de datos en MATLAB.

Siga los siguientes pasos para escalar la medición del sensor.

1. Realice las configuraciones previas en campo, las cuales se describen al iniciar la guía G-IE-LCPA-02.
2. Realice las conexiones que se indican en la figura 1.

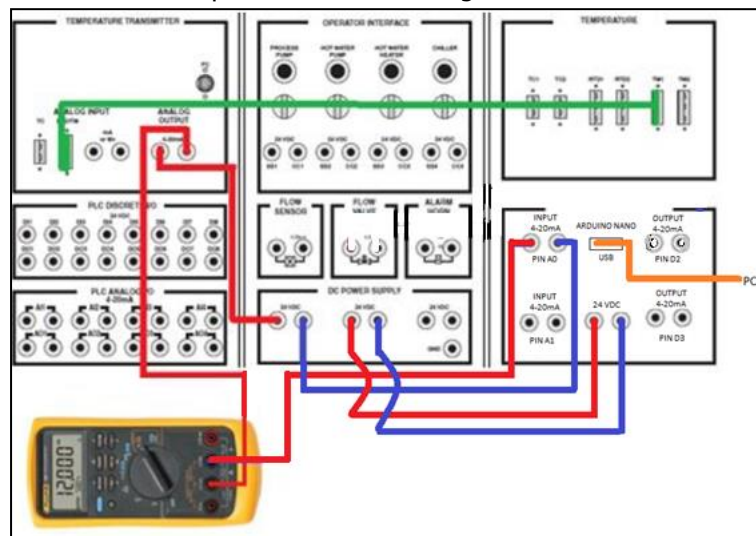


Figura 1: Conexión para la medición de la corriente del termistor y la lectura en MATLAB.

3. Con la ayuda del laboratorista retire el candado de seguridad de la planta, también verifique que se encuentra conectada al suministro de energía y finalmente enciendala.
4. El termostato (JC 1100) se debe colocar a 160°F.
5. Encender la bomba del proceso (PROCESS PUMP), el calentador (HOT WATER EATER) y el enfriador (CHILLER), como se indica en la figura 2.



Figura 2: Interface de operador

6. Esperar hasta que la temperatura en el tanque del proceso (TK1) sea aproximadamente 10 grados y la temperatura en el tanque de servicio (TK2) sea 70°C.
7. Ejecutar MATLAB.
8. Dirigirse a los archivos de la memoria USB, abrir la carpeta "EscenarioControlPlantaTemperatura", luego abrir la carpeta "Curva de reacción", llegados a este punto se copia la ubicación de los archivos como se indica en la figura 3.

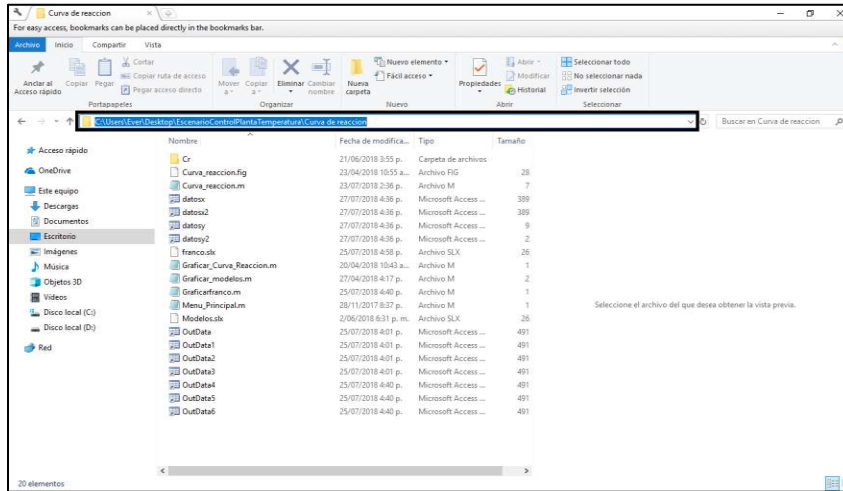


Figura 3: Ubicación en Windows de los archivos necesarios para ejecutar la prueba.

9. El recuadro negro de la figura 4 indica el lugar donde se debe pegar la dirección copiada, luego presionar la tecla "Enter", por otra parte el recuadro rojo de la misma figura debe mostrar los archivos de la carpeta "Curva de reacción".

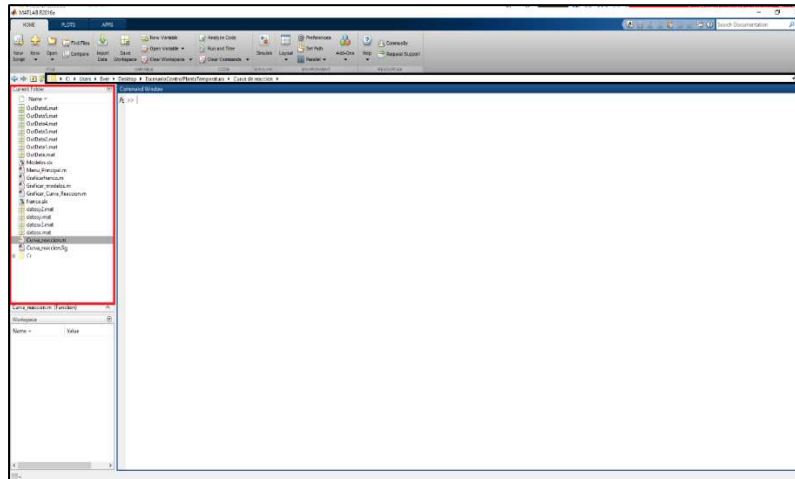


Figura 4: Espacio de trabajo de MATLAB

10. Se buscan los archivos "Menú\_Principal.m" y "Curva\_reacción.m" en el current folder (recuadro rojo de la figura 4), y se abren.
11. En el script "Curva\_reacción.m", se quita el ";" a la línea de código 168.



12. Se compila el script "Menú principal" y debe aparecer la siguiente interfaz de usuario.

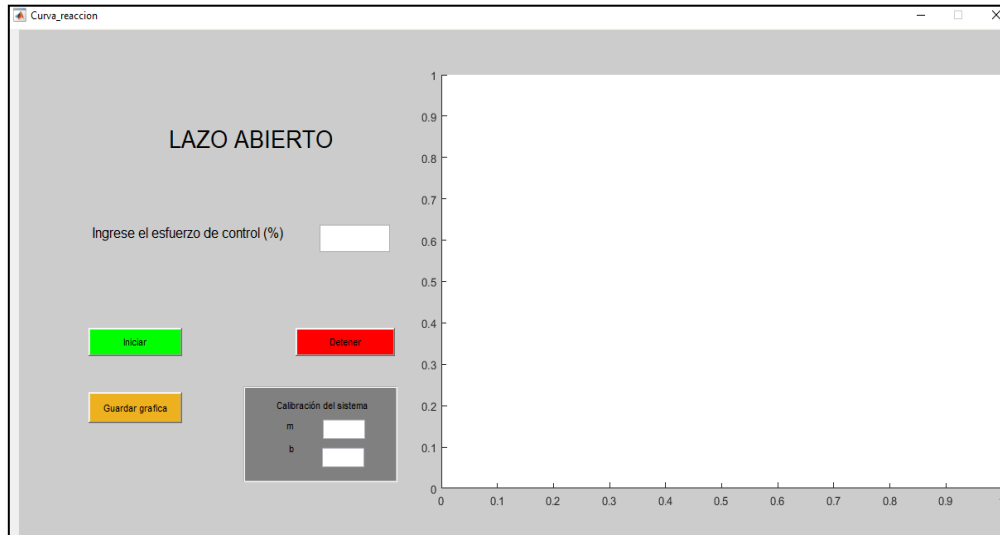


Figura 5: Interfaz de usuario

13. En el espacio contiguo a "Ingrese el esfuerzo de control (%)" colocar 10 y presionar "Enter", que hace referencia al porcentaje de apertura de la válvula. Este porcentaje hace que la válvula se abra completamente y la temperatura del agua en el tanque de servicio empiece a calentarse.
14. Se presiona el botón de Iniciar
15. Se enciende la bomba del lazo de servicio (HOT WATER PUMP), en consecuencia la interface de operador debe mirarse como se indica en la fotografía 1



Fotografía 1: Interfaz de operador.

16. Minimice la interfaz, para poder mirar el comand Windows de MATLAB.

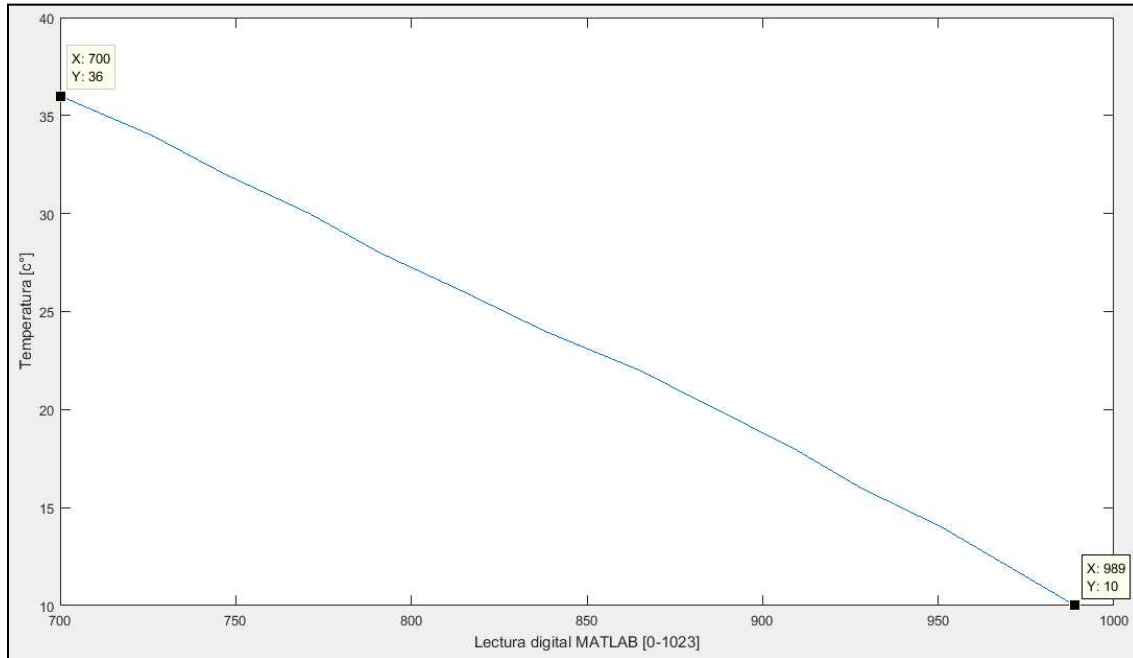
17. Se registran los datos del sensor espiral de terminación fija (TI600C) del tanque del proceso (TK1), del multímetro y la lectura digital del comand windows cada vez que la temperatura en el tanque del proceso suba 2 grados.

Nota: Los datos obtenidos deben ser parecidos a los enseñados en la tabla 1, de no ser así debe calibrar el sensor con la guía G-IE-LCPA.

<b>Temperatura(C°)</b>	<b>Corriente sensor(mA)</b>	<b>Lectura digital MATLAB(0-1023)</b>
<b>10</b>	19,09	989
<b>12</b>	18,6	970
<b>14</b>	18,22	951
<b>16</b>	17,81	928
<b>18</b>	17,47	909
<b>20</b>	17,03	887
<b>22</b>	16,6	865
<b>24</b>	16,1	838
<b>26</b>	15,7	815
<b>28</b>	15,26	791
<b>30</b>	14,87	771
<b>32</b>	14,44	747
<b>34</b>	14,03	726
<b>36</b>	13,57	700

*Tabla 1: temperatura del proceso con su equivalencia en corriente y lectura en MATLAB*

18. Se presiona el botón "detener" en la interfaz de usuario y se cierra la interfaz.  
19. Se grafica la temperatura vs lectura en MATLAB, como se indica en la siguiente figura:



*Gráfica 1: Gráfica de temperatura vs lectura en MATLAB (0-1023).*

20. A partir de la gráfica se utiliza la ecuación de la recta punto a punto,

$$Y = m(x - x_1) + y_1$$

Donde:

$$m = \frac{y_2 - y_1}{X_2 - X_1}$$

Y se halla una ecuación de la forma:

$$Y = mx + b$$

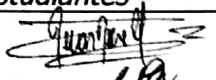
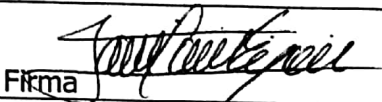
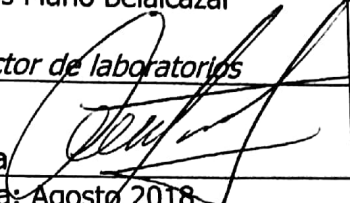
21. Existen dos maneras de escalizar la temperatura en el código, a continuación se describe cada una de ellas.

- 21.1. Dirigirse al script "Curva de reacción" y en las líneas 28 y 29 cambiar los valores de m y b, por lo encontrados, luego guardar los cambios.
- 21.2. Ejecutar nuevamente la interfaz y antes de presionar el botón de iniciar en el espacio que dice m y b ingresar lo valores encontrados.

Nota: es importante mencionar que para que el código de la interfaz pueda captar lo valores que se ingresan en las cajas de texto, es necesario cada vez que se ingrese un valor, presionar Enter.

22. Cierre MATLAB, apague la planta, realice las desconexiones a las que haya lugar y entregue los elementos al laboratorista.



CONTROL DE EMISIÓN		
Elaboró	Revisó	Autorizó
Juan José Muñoz Lina Marcela Lara <i>Estudiantes</i>	Jaime Francisco España <i>Laboratorista</i>	Carlos Mario Belalcázar <i>Director de laboratorios</i>
 Firma	 Firma	 Firma
Fecha: Agosto 2018	Fecha: Agosto 2018	Fecha: Agosto 2018

parámetros de sintonización para realizar control a la planta de temperatura.

Los métodos teóricos más conocidos para encontrar un modelo de primer orden más tiempo muerto a partir de la curva de reacción son:[1]

- a. Método de la tangente de Ziegler y Nicholds
- b. Método de la tangente de Cohen y Coon
- c. Método de dos puntos generales.

Es importante mencionar que los métodos descritos son aplicables si la curva de reacción se obtuvo mediante una prueba de lazo abierto.

Luego de obtener el modelo de primer orden, se pueden utilizar métodos teóricos de sintonización para encontrar los parámetros del controlador, los más conocidos son:

- a. Fórmulas de sintonización Ziegler y Nicholds en lazo abierto
- b. Fórmulas de sintonización de Cohen y Coon en lazo abierto.

A continuación, se relacionan en la tabla 1 y 2 las fórmulas de sintonización de Ziegler y Nicholds y Cohen y Coon.

		Parámetros		
		Kp (Ganancia proporcional)	Ti (Tiempo integrativo)	Td (Tiempo derivativo)
<b>Tipo de controlador</b>	Controlador P	$\frac{1}{k} \left( \frac{tm}{\tau} \right)^{-1}$	-	-
	Controlador PI	$\frac{0.9}{k} \left( \frac{tm}{\tau} \right)^{-1}$	3.33tm	-
	Controlador PID	$\frac{1.2}{k} \left( \frac{tm}{\tau} \right)^{-1}$	2tm	$\frac{tm}{2}$

Tabla 1: Formulas de sintonización de Ziegler y Nicholds en lazo abierto. [2]

		Parámetros		
		Kp (Ganancia proporcional)	Ti (Tiempo integrativo)	Td (Tiempo derivativo)
<b>Tipo de controlador</b>	Controlador P	$\frac{1}{k} \frac{\tau}{tm} \left( 1 + \frac{tm}{3\tau} \right)$	-	-
	Controlador PI	$\frac{1}{k} \frac{\tau}{tm} \left( \frac{9}{10} + \frac{tm}{12\tau} \right)$	$tm \left( \frac{30 + 3 \frac{tm}{\tau}}{9 + 20 \frac{tm}{\tau}} \right)$	-

	Controlador PID	$\frac{1}{k} \frac{\tau}{tm} \left( \frac{4}{3} + \frac{tm}{4\tau} \right)$	$tm \left( \frac{32 + 6 \frac{tm}{\tau}}{13 + 8 \frac{tm}{\tau}} \right)$	$tm \left( \frac{4}{11 + 2 \frac{tm}{\tau}} \right)$
--	-----------------	---	---	--

Tabla 2: Formulas de sintonización de Cohen y Coon en lazo abierto. [3]

Donde:

$k$  = Ganancia

$tm$  = Tiempo muerto

$\tau$  = Constante de tiempo

Por otro lado, es necesario decir que el controlador se encuentra saturado en porcentaje de 0 a 100, razón por la cual cuando se realice el cálculo de la ganancia se debe hacer de la siguiente manera:

$$k = \frac{\Delta y(\%)}{\Delta u(\%)}$$

Donde:

$\Delta y(\%)$  = Cambio en porcentaje de la variable del proceso, respecto al spam del sensor de medición que es de 10 a 76°C.

$\Delta u(\%)$  = Cambio en porcentaje de la variable manipulada.

## EQUIPOS Y MATERIALES

- Cable de extensión del termistor
- 4 cables de conexión rojos
- 3 cables de conexión negros
- Cable de conexión USB USB
- Memoria USB, la cual contiene los archivos de ejecución.

## PROCEDIMIENTO

Llegados a este punto, se procede a mencionar las configuraciones que se deben realizar en campo antes de encender la planta.

1. Verifique que la bomba del proceso (PROCESS PUMP), el enfriador (CHILLER), la bomba de agua caliente (HOT WATER PUMP) y el calentador (HOT WATER HEATER) se encuentren apagados, como se indica en la fotografía 1.



Fotografía 1: Interfaz de operador

2. Acerca del instrumento PC1000, se debe conectar al suministro de aire, como se indica en la fotografía 2:



Fotografía 2: Conexión del suministro de aire.

3. Por otro lado se debe encender el compresor, desde el panel de switch como se indica en la fotografía 3.



Fotografía 3: Switch del compresor.

4. Hay que mencionar que el valor del instrumento PI1000A, debe indicar 20 PSI, como se muestra en la fotografía 4.



Fotografía 4: Valor en PSI que debe estar el PI 1000A.

Nota: Si el valor del PI 1000A, no se encuentra en 20 PSI, se debe desplazar la perilla que se encuentra en la base del instrumento hacia abajo y girarla hasta que la medición sea correcta, acto seguido, se desplaza la perilla hasta su posición inicial.

5. En campo asegúrese que las siguientes válvulas se encuentren cerradas
  - HV 500B, HV 500D, HV 700
6. En campo asegúrese que las siguientes válvulas se encuentren abiertas
  - HV 500A, HV500C
7. Se debe verificar el nivel de los tanques
  - TK1: Mínimo  $\frac{3}{4}$  de la capacidad máxima
  - TK2: sobrepasar el instrumento LS900

Acto seguido, se enseñan los pasos que se deben seguir para realizar la práctica de control a la planta de temperatura Amatrol T5553.

1. Realizar las conexiones que se indican en la figura 1:

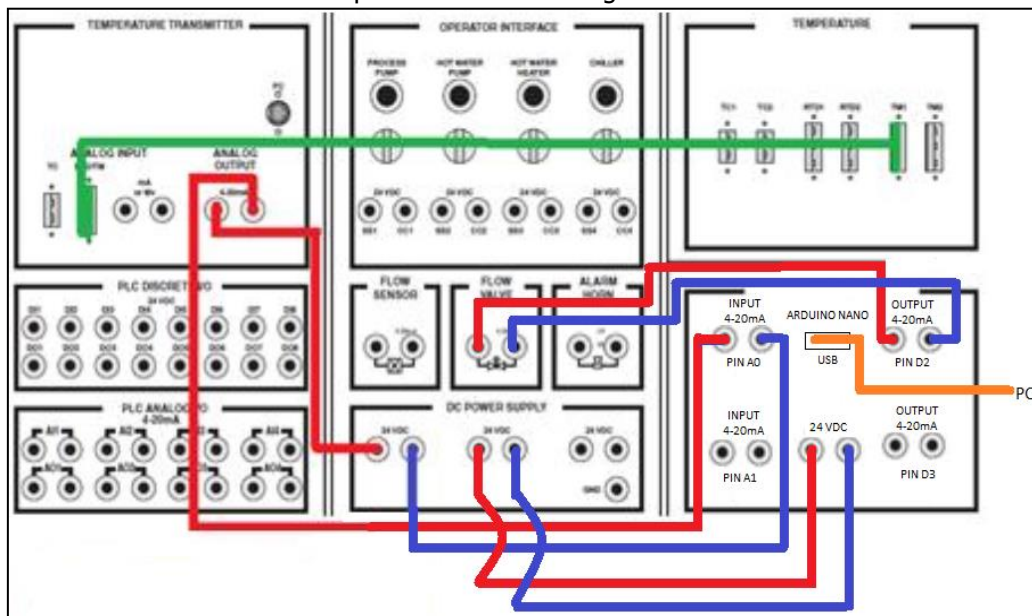


Figura 1: Conexiones necesarias para la prueba.



2. Con la ayuda del laboratorista, quitar el candado de seguridad de la planta, verificar que la planta se encuentre conectada a la red eléctrica y encenderla.
3. Encender el calentador del tanque del lazo de servicio (HOT WATER EATER), como se indica en la fotografía 5.



Fotografía 5: Calentador del tanque de servicio en estado encendido

4. Graduar la temperatura del tanque del lazo de servicio desde el termostato (JC 1100) a 130°F, como se muestra en la fotografía 6.



Fotografía 6: Termostato graduado a 130°F

5. Se espera a que la temperatura en el tanque del lazo de servicio (TK2) sea aproximadamente 50 C, como se enseña en la fotografía 7.



Fotografía 7: Indicador de temperatura del tanque de servicio

6. Se enciende la bomba del lazo principal (PROCESS PUMP) y el enfriador (CHILLER), en consecuencia la interfaz de operador (OPERATOR INTERFACE) debe mirarse como se indica en la fotografía 8.



Fotografía 8: Interfaz de operador

7. Dirigirse a los archivos de la memoria USB, abrir la carpeta "EscenarioControlPlantaTemperatura", luego abrir la carpeta "Control", acto seguido abrir otra carpeta denominada "Control", que contiene un código en ARDUINO. Ese código se debe quemar a la tarjeta Arduino Mega del sistema de adquisición de datos.
8. Ejecutar MATLAB
9. Dirigirse a los archivos de la memoria USB, abrir la carpeta "EscenarioControlPlantaTemperatura", luego abrir la carpeta "Control", llegados a este punto se copia la ubicación de los archivos como se indica en la figura 2.

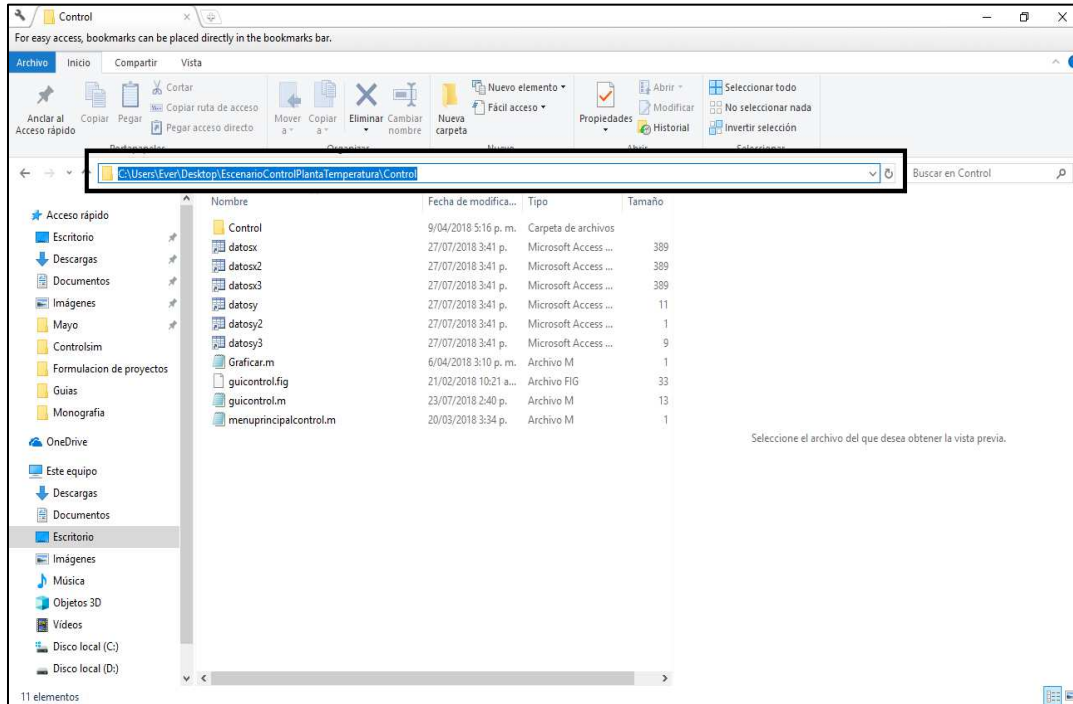


Figura 2: Ubicación en Windows de los archivos necesarios para ejecutar la prueba

10. Pegar en el buscador de archivos de MATLAB la dirección copiada y presionar la tecla "Enter", el recuadro negro de la figura 3 indica donde se debe pegar, por otra parte el recuadro rojo de la misma figura debe mostrar los archivos de la carpeta "Control".

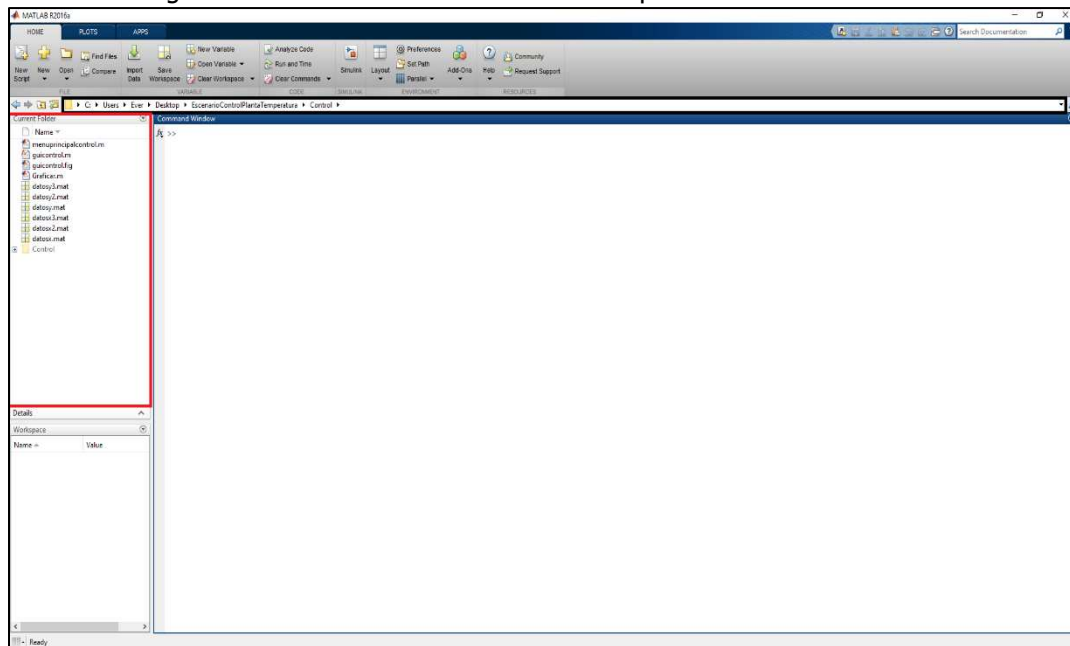


Figura 3: Espacio de trabajo de MATLAB

11. En MATLAB se abren los archivos "menuprincipal.m", "guicontrol.m" y "graficar.m", que se encuentran ubicados en el *current folder* (cuadro rojo de la figura 3).
12. En el script "guicontrol.m" se busca la línea 109 y se cambia el número del COM al que designo el computador.
13. Se compila el archivo denominado "menúprincipalcontrol.m", se espera un momento y debe aparecer la siguiente interfaz:

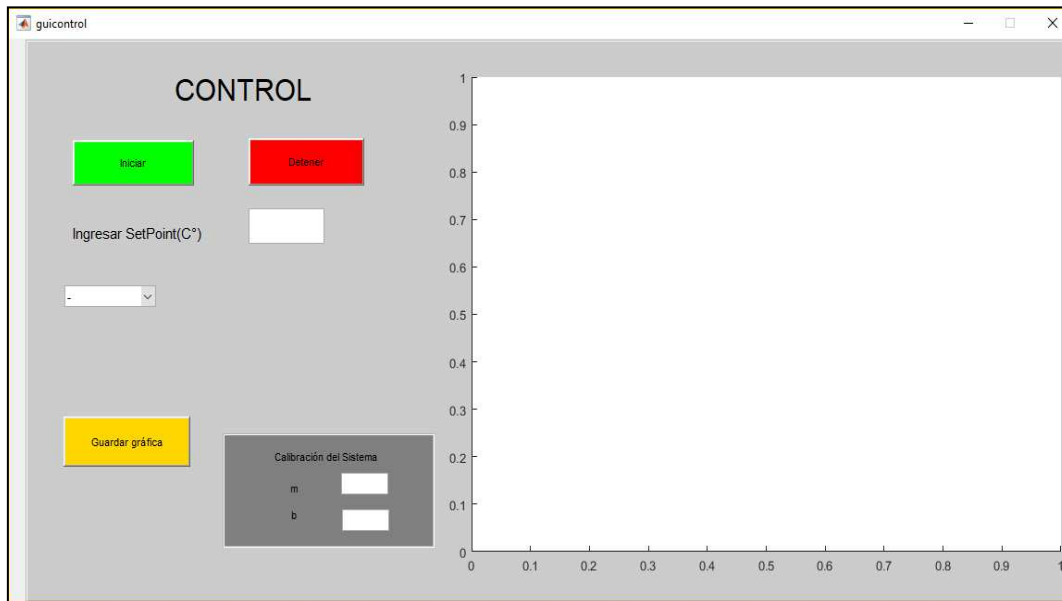


Figura 2: Interfaz de control para la planta de temperatura Amatrol T5553.

14. En el espacio Ingresar SetPoint(c°), de debe colocar la consigna a la que se quiere hacer llegar la variable del proceso, es importante mencionar que este valor debe estar entre 10 y 76.7°C ya que es el rango de medición del sensor, por otro lado cuando se ingrese el valor se debe presionar la tecla enter.
15. En el menú desplegable se escoge el tipo de control que se quiere realizar (P,PI o PID), cuando ya se ha seleccionado el tipo de control, debe aparecer las cajas de texto para ingresar los parámetros de sintonización.
16. Se ingresan las constantes de sintonización encontradas previamente ( $k_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$ ) y al terminar de escribir cada una se presiona la tecla "enter", para que dichos valores sean captados por el código base. Si no se tienen los parámetros de sintonización diríjase al capítulo IV del trabajo de investigación titulado "Diseño e implementación de un escenario de control para la planta de temperatura Amatrol T5553 del laboratorio de procesos de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca".
17. Se enciende la bomba del lazo de servicio (HOT WATER PUMP), en consecuencia la interfaz de operador debe mirarse como se indica en la fotografía 9.



Fotografía 9: Interfaz de operador.

18. Nuevamente en la interfaz de usuario se presiona el botón iniciar y la compilación debe arrancar, la línea verde corresponde al Set Point, la azul a la variable del proceso y la roja al esfuerzo de control que se envía a la válvula de corresponde a una señal de 4-20mA.

**Nota:** Si en la interfaz de usuario los datos de la variable del proceso que se están obteniendo no corresponden a los sentidos por el espiral de terminación fija del tanque del proceso, sírvase ver el anexo de la guía G-IE-LCPA-02 hasta el paso 14, de allí siga cualquiera de los dos pasos que se muestran enseguida, caso contrario si las datos son los mismos diríjase al paso 19.

- a. Dirijirse al script "guicontrol" y en las líneas 45 y 46 cambiar los valores de m y b, por lo encontrados, luego guardar los cambios.
  - b. Ejecutar nuevamente la interfaz de control y antes de presionar el botón de iniciar en el espacio que dice m y b ingresar lo valores encontrados, es importante mencionar que para que el código de la interfaz pueda captar lo valores que se ingresan en las cajas de texto, es necesario cada vez que se ingrese un valor, presionar enter.
19. Esperar hasta que la variable del proceso alcance el Set Point, en este espacio se puede evidenciar la acción de control en el rotámetro (FV 700), debido a que el flujo va a aumentar o disminuir dependiendo el caso cuando la variable controlada este alcanzando la consigna.
20. Se pueden realizar cambios al Set Point, ingresando un nuevo valor y presionando la tecla "Enter".
21. Cuando se quiera parar la simulación, se presiona el botón "Detener" en la interfaz y luego el botón "Guardar grafica".
22. Se cierra la interfaz.
23. Cada vez que se requiera graficar la curva obtenida se compila el script "Graficar", y la gráfica aparecerá ya que los vectores se encuentran almacenados en la carpeta "Control", sin embargo es importante mencionar que si se vuelve a ejecutar la interfaz para obtener



nuevos resultados, los vectores se pierden, pero si se han copiado a otra carpeta de seguridad no habrá problema.

24. Finalmente cierre MATLAB, apague la planta, realice las desconexiones a las que haya lugar y entregue los elementos al laboratorista.

### RECOMENDACIONES

Respetar las políticas y reglamento de laboratorios.

Utilizar los elementos de protección individual en caso de ser necesario.

Solicitar los elementos o equipos de laboratorio a tiempo, según lo establece el reglamento.

### BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. M. Alfaro, *Sobreamortiguados Utilizando*, vol. 11. .  
[2] C. A. Smith, *Control Automatico de Procesos Teoria y Practica*. .  
[3] D. R. Coughanowr and S. E. Leblanc, *Process Systems Analysis and Control*. 2008.

CONTROL DE EMISIÓN		
Elaboró	Revisó	Autorizó
Juan José Muñoz Lina Marcela Lara <i>Estudiantes</i>	Jaime Francisco España <i>Laboratorista</i>	Carlos Mario Belalcázar <i>Director de Laboratorios</i>
Firma	Firma	Firma
Fecha: Agosto 2018	Fecha: Agosto 2018	Fecha: Agosto 2018

Los métodos teóricos más conocidos para encontrar un modelo de primer orden más tiempo muerto a partir de la curva de reacción son:[1]

- Método de la tangente de Ziegler y Nicholds
- Método de la tangente de Cohen y Coon
- Método de dos puntos generales.

Es importante mencionar que los métodos descritos son aplicables si la curva de reacción se obtuvo mediante una prueba de lazo abierto.

Luego de obtener el modelo de primer orden, se pueden utilizar métodos teóricos de sintonización para encontrar los parámetros del controlador, los más conocidos son:

- Fórmulas de sintonización Ziegler y Nicholds en lazo abierto
- Fórmulas de sintonización de Cohen y Coon en lazo abierto.

A continuación, se relacionan en la tabla 1 y 2 las fórmulas de sintonización de Ziegler y Nicholds y Cohen y Coon.

		Parámetros		
		Kp (Ganancia proporcional)	Ti (Tiempo integrativo)	Td (Tiempo derivativo)
<b>Tipo de controlador</b>	Controlador P	$\frac{1}{k} \left( \frac{tm}{\tau} \right)^{-1}$	-	-
	Controlador PI	$\frac{0.9}{k} \left( \frac{tm}{\tau} \right)^{-1}$	3.33tm	-
	Controlador PID	$\frac{1.2}{k} \left( \frac{tm}{\tau} \right)^{-1}$	2tm	$\frac{tm}{2}$

Tabla 1: Formulas de sintonización de Ziegler y Nicholds en lazo abierto. [2]

		Parámetros		
		Kp (Ganancia proporcional)	Ti (Tiempo integrativo)	Td (Tiempo derivativo)
<b>Tipo de controlador</b>	Controlador P	$\frac{1}{k} \frac{\tau}{tm} \left( 1 + \frac{tm}{3\tau} \right)$	-	-
	Controlador PI	$\frac{1}{k} \frac{\tau}{tm} \left( \frac{9}{10} + \frac{tm}{12\tau} \right)$	$tm \left( \frac{30 + 3 \frac{tm}{\tau}}{9 + 20 \frac{tm}{\tau}} \right)$	-

	Controlador PID	$\frac{1}{k} \frac{\tau}{tm} \left( \frac{4}{3} + \frac{tm}{4\tau} \right)$	$tm \left( \frac{32 + 6 \frac{tm}{\tau}}{13 + 8 \frac{tm}{\tau}} \right)$	$tm \left( \frac{4}{11 + 2 \frac{tm}{\tau}} \right)$
--	-----------------	---	---	--

Tabla 2: Formulas de sintonización de Cohen y Coon en lazo abierto. [3]

Donde:

$k$  = Ganancia

$tm$  = Tiempo muerto

$\tau$  = Constante de tiempo

Por otro lado, es necesario decir que el controlador se encuentra saturado en porcentaje de 0 a 100, razón por la cual cuando se realice el cálculo de la ganancia se debe hacer de la siguiente manera:

$$k = \frac{\Delta y(\%)}{\Delta u(\%)}$$

Donde:

$\Delta y(\%)$  = Cambio en porcentaje de la variable del proceso, respecto al spam del sensor de medición que es de 10 a 76°C.

$\Delta u(\%)$  = Cambio en porcentaje de la variable manipulada.

## EQUIPOS Y MATERIALES

- Cable de extensión del termistor
- 4 cables de conexión rojos
- 3 cables de conexión negros
- Cable de conexión USB USB
- Memoria USB, la cual contiene los archivos de ejecución.

## PROCEDIMIENTO

Llegados a este punto, se procede a mencionar las configuraciones que se deben realizar en campo antes de encender la planta.

1. Verifique que la bomba del proceso (PROCESS PUMP), el enfriador (CHILLER), la bomba de agua caliente (HOT WATER PUMP) y el calentador (HOT WATER HEATER) se encuentren apagados, como se indica en la fotografía 1.





Fotografía 1: Interfaz de operador

2. Acerca del instrumento PC1000, se debe conectar al suministro de aire, como se indica en la fotografía 2:



Fotografía 2: Conexión del suministro de aire.

3. Por otro lado se debe encender el compresor, desde el panel de switch como se indica en la fotografía 3.



Fotografía 3: Switch del compresor.

4. Hay que mencionar que el valor del instrumento PI1000A, debe indicar 20 PSI, como se muestra en la fotografía 4.



Fotografía 4: Valor en PSI que debe estar el PI 1000A.

Nota: Si el valor del PI 1000A, no se encuentra en 20 PSI, se debe desplazar la perilla que se encuentra en la base del instrumento hacia abajo y girarla hasta que la medición sea correcta, acto seguido, se desplaza la perilla hasta su posición inicial.

5. En campo asegúrese que las siguientes válvulas se encuentren cerradas
  - HV 500B, HV 500D, HV 700
6. En campo asegúrese que las siguientes válvulas se encuentren abiertas
  - HV 500A, HV500C
7. Se debe verificar el nivel de los tanques
  - TK1: Mínimo  $\frac{3}{4}$  de la capacidad máxima
  - TK2: sobrepasar el instrumento LS900

Acto seguido, se enseñan los pasos que se deben seguir para realizar la práctica de control a la planta de temperatura Amatrol T5553.

1. Realizar las conexiones que se indican en la figura 1:

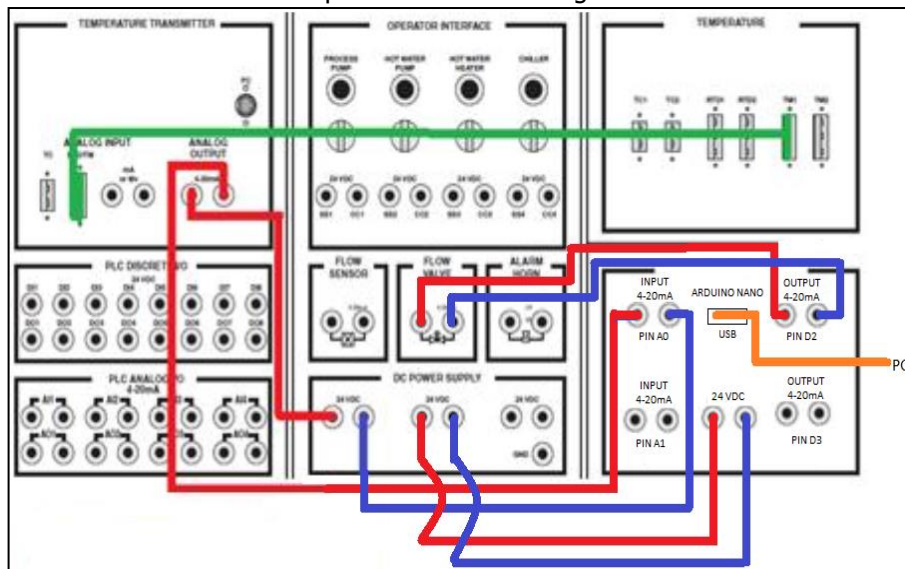


Figura 1: Conexiones necesarias para la prueba.

2. Con la ayuda del laboratorista, quitar el candado de seguridad de la planta, verificar que la planta se encuentre conectada a la red eléctrica y encenderla.

3. Encender el calentador del tanque del lazo de servicio (HOT WATER HEATER), como se indica en la fotografía 5.



Fotografía 5: Calentador del tanque de servicio en estado encendido

4. Graduar la temperatura del tanque del lazo de servicio desde el termostato (JC1100) a 130°F, como se muestra en la fotografía 6.



Fotografía 6: Termostato graduado a 130°F

5. Se espera a que la temperatura en el tanque del lazo de servicio (TK2) sea aproximadamente 50 C°, como se enseña en la fotografía 7.



Fotografía 7: Indicador de temperatura del tanque de servicio

- Se enciende la bomba del lazo principal (PROCESS PUMP) y el enfriador (CHILLER), en consecuencia la interfaz de operador (OPERATOR INTERFACE) debe mirarse como se indica en la fotografía 8.



Fotografía 8: Interfaz de operador

- Ejecutar MATLAB
- Dirijirse a los archivos de la memoria USB, abrir la carpeta "EscenarioControlPlantaTemperatura", luego abrir la carpeta "Controlsim", llegados a este punto se copia la ubicación de los archivos como se indica en la figura 2.

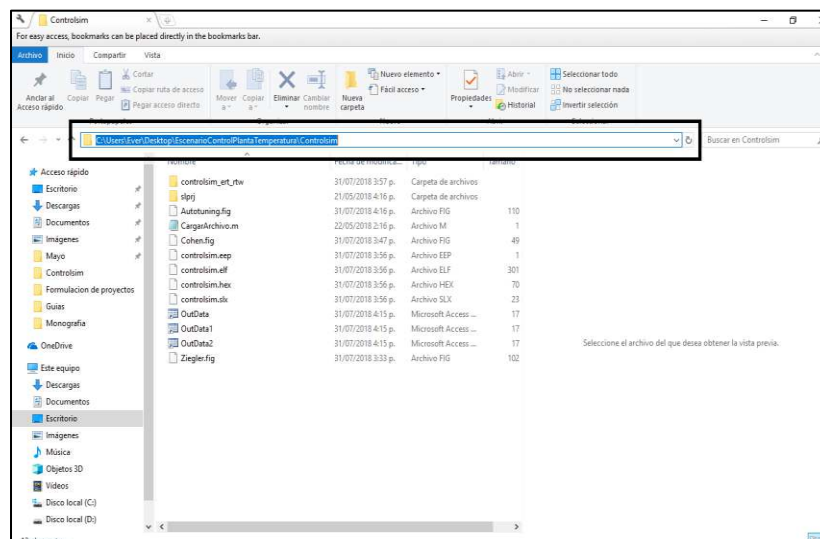


Figura 2: Ubicación en Windows de los archivos necesarios para ejecutar la prueba

9. Pegar en el buscador de archivos de MATLAB la dirección copiada y presionar la tecla "Enter", el recuadro negro de la figura 3 indica donde se debe pegar, por otra parte el recuadro rojo de la misma figura debe mostrar los archivos de la carpeta "Controlsim".

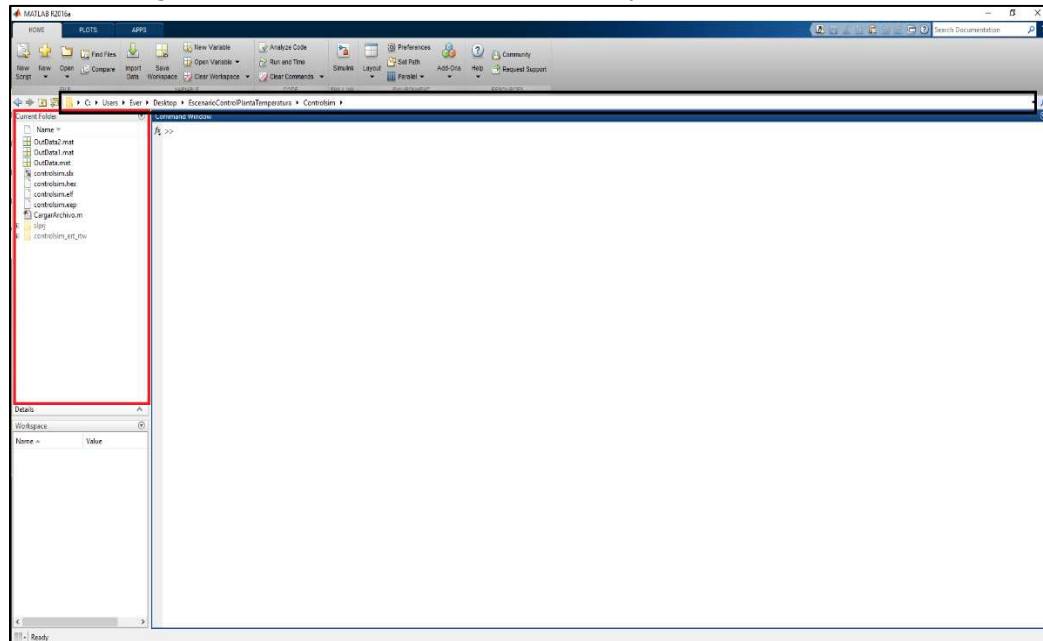


Figura 3: Espacio de trabajo de MATLAB

10. En el recuadro rojo de la figura 3, ubicar y abrir el archivo "controlsim.slx". Debe aparecer en Simulink la estructura de control que se enseña en la figura 4.

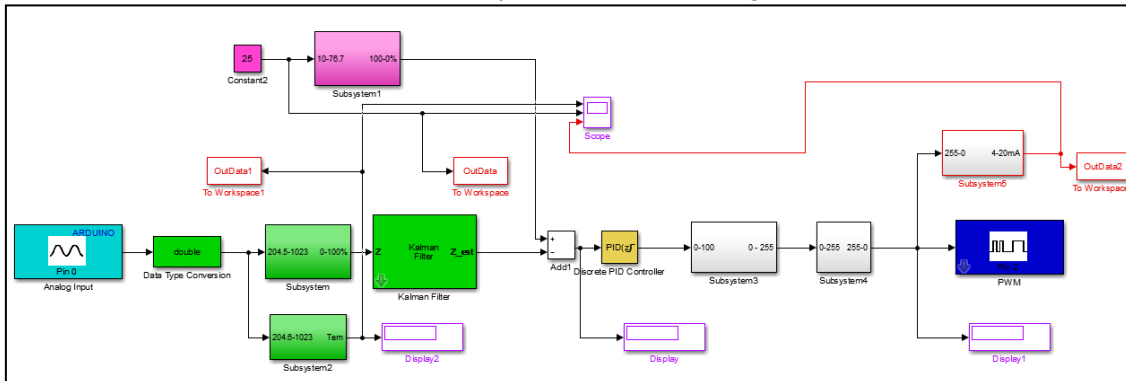


Figura 4: Estructura de control en Simulink de MATLAB.

Nota: si se quiere ver la explicación de la estructura de la figura 4 sírvase ver la monografía titulada "Diseño e implementación de un escenario de control para la planta de temperatura Amatrol T5553 del laboratorio de procesos de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca".

11. Ingrese en el bloque "Constant2", el valor de Set Point deseado en °C, que debe estar entre un valor de 10 a 76.7, porque es el rango de medición del sensor termistor.

12. Verifique que en el bloque "Analog Input" este seleccionado el pin 0 y en el bloque "PWM" el pin 2, en ese orden de ideas, si en el sistema de adquisición de datos se está utilizando la entrada Input 2 o la salida Output 2, el bloque "Analog Input" debe estar configurado con el pin 1 y el bloque "PWM" con el pin 3.
13. Ingresar en el bloque "PID Controller" los parámetros de sintonización. Si no se tienen diríjase al capítulo IV del trabajo de investigación titulado "Diseño e implementación de un escenario de control para la planta de temperatura Amatrol T5553 del laboratorio de procesos de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca".
14. Presionar el botón "Run" de Simulink, como se indica en la figura 5.

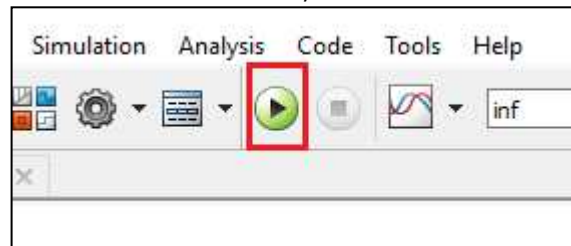


Figura 5: Botón Run de Simulink

Nota: La compilación se demora un tiempo considerable, aproximadamente 2 a 4 minutos, porque Simulink primeramente embebe en la tarjeta Arduino mega el código para configurar el pin A0 como entrada analógica y el pin D2 como salida PWM, luego, las compilaciones duran mucho menos. Por otro lado cuando la compilación esta por completarse aparece una ventana emergente como la que se enseña en la figura 6..

Por otra parte el bloque "Display2" muestra el valor de temperatura del tanque del proceso, el bloque "Display" muestra el error en porcentaje y el bloque "Display1" enseña el esfuerzo de control como una señal PWM de 0 a 255.

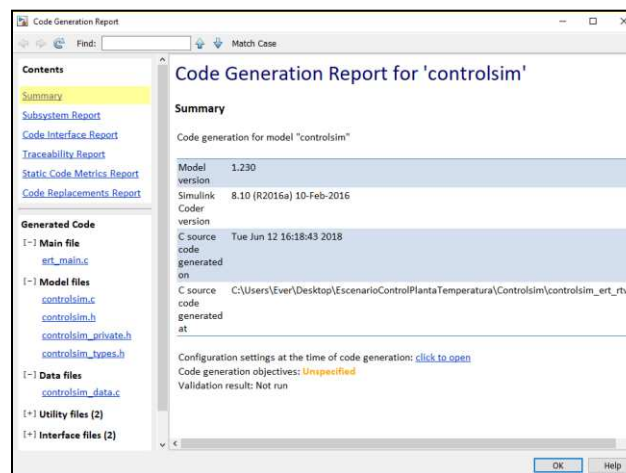


Figura 6: Ventana emergente de certificación de compilación

Nota: Se debe presionar el botón "Ok" en la ventana emergente de la figura 6.

15. Encienda la bomba del lazo de servicio (HOT WATER PUMP), en consecuencia la interfaz de operador debe mirarse como se indica en la fotografía 9.



Fotografía 9: Interfaz de operador.

16. Si la temperatura mostrada en el bloque "Display2" no corresponde con la temperatura sensada por el sensor de espiral fijo del tanque del proceso (TK1), pare la simulación y realice los siguientes subpasos, de lo contrario salte al paso 17.
- 16.1. Diríjase al anexo de la guía G-IE-LCPA-02 hasta el paso 14, y con la ecuación de la recta encontrada, abra el bloque "Subsystem2" en el esquema de Simulink y cambie el valor del bloque "Gain" por el valor de "m", y en el valor del bloque "constant" coloque el valor de "b".
17. Cuando se esté ejecutando la simulación es posible mirar el seguimiento al Set Point de la variable del proceso abriendo el scope, también allí se puede observar el esfuerzo de control que se envía a la válvula de flujo como una señal de 4-20mA. El Set Point es la señal Azul, la variable del proceso es la señal amarilla y el esfuerzo de control es la señal naranja.
18. Esperar hasta que la variable del proceso alcance el Set Point, en este espacio se puede evidenciar la acción de control en el rotámetro (FV 700), debido a que el flujo va a aumentar o disminuir dependiendo el caso cuando la variable controlada este alcanzando la consigna.
19. Si se requiere realizar un cambio al Set Point se puede hacer en el bloque "Constant2", es importante mencionar que el rango de temperatura ingresado debe estar entre 10 y 76.7 grados ya que es el spam del dispositivo de medición.
20. Para mirar la gráfica de control, pare la simulación y diríjase al espacio de trabajo de MATLAB y en "current folder" abra el archivo "CargarArchivo.m", luego ejecútelo. En la figura que aparece, la línea verde corresponde al SetPoint, la línea azul a la variable del proceso y la línea roja al esfuerzo de control, que es la señal de 4-20mA enviada a la válvula de flujo.
21. Si desea puede guardar la gráfica obtenida en el paso 20.
22. Finalmente cierre MATLAB, apague la planta, realice las desconexiones a las que haya lugar y entregue los elementos al laboratorista.



### RECOMENDACIONES

Respetar las políticas y reglamento de laboratorios.  
Utilizar los elementos de protección individual en caso de ser necesario.  
Solicitar los elementos o equipos de laboratorio a tiempo, según lo establece el reglamento.

### BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. M. Alfaro, *Sobreamortiguados Utilizando*, vol. 11. .
- [2] C. A. Smith, *Control Automatico de Procesos Teoría y Práctica*. .
- [3] D. R. Coughanowr and S. E. Leblanc, *Process Systems Analysis and Control*. 2008.

CONTROL DE EMISIÓN		
Elaboró	Revisó	Autorizó
Juan José Muñoz Lina Marcela Lara <i>Estudiantes</i>	Jaime Francisco España <i>Laboratorista</i>	Carlos Mario Belalcázar <i>Director de laboratorios</i>
Firma	Firma	Firma
Fecha: Agosto 2018	Fecha: Agosto 2018	Fecha: Agosto 2018